

Федеральное Государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(НИТУ «МИСиС»)

На правах рукописи

КОЛИСТРАТОВ МАКСИМ ВАСИЛЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ КОНТРОЛЯ АГРЕГАТНОГО
СОСТОЯНИЯ РАСПЛАВЛЯЕМОГО МЕТАЛЛА И УПРАВЛЕНИЯ
ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРОНАГРЕВА**

Специальность 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)»

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор

Шкундин Семен Захарович

Москва – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ ПЛАВИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ И СПОСОБЫ КОНТРОЛЯ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ РАСПЛАВЛЯЕМОГО МАТЕРИАЛА	13
1.1 Анализ существующих систем автоматизированного управления процессом плавки в тигельных печах сопротивления	13
1.2 Обзор существующих систем автоматизированного управления процессом плавки в дуговых печах	19
1.2.1 Обзор методов управления дуговыми печами переменного тока	19
1.2.2 Обзор методов управления дуговыми печами постоянного тока.....	23
1.3 Методы определения агрегатного состояния в печи с двумя источниками нагрева	26
1.4 Выводы по главе и постановка задач исследования	32
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ МОМЕНТА РАСПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПЛАВКЕ	34
2.1 Анализ разностных изображений при расплавлении	34
2.2 Оценка площади поверхности расплавляемого металла в период плавки	39
2.3 Оценка фрактальной размерности поверхности при расплавлении	70
2.4 Выводы по главе 2	80
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ РАСПЛАВЛЯЕМОГО МАТЕРИАЛА	81
3.1 Выбор цветовой модели получаемого изображения.....	81
3.2 Система визуального контроля поверхности металла.....	84
3.3 Программное обеспечение.....	89
3.3.1 Вычитание изображений.....	94

3.3.2 Анализ бинарного изображения.....	98
3.4 Выводы по главе 3	101
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ВРЕМЕНИ ПЕРЕХОДА МЕТАЛЛА ИЗ ТВЕРДОГО СОСТОЯНИЯ В ЖИДКОЕ В ПЛАВИЛЬНОМ АГРЕГАТЕ С 2-МЯ ИСТОЧНИКАМИ НАГРЕВА	102
4.1 Плавильный агрегат с 2-мя источниками электрического нагрева как объект управления	102
4.2 Разработка функциональной схемы управления электрическим режимом плавильного агрегата с 2-мя источниками электрического нагрева	106
4.3 Разработка алгоритма управления плавильного агрегата с 2-мя источниками электрического нагрева	107
4.4 Выводы по главе 4	116
ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ	117
5.1 Используемое оборудование и методика эксперимента	117
5.2 Оценка полученных взаимосвязей изображений с текущим агрегатным состоянием расплавляемого материала.....	122
5.2.1 Плавка с температурной дискретизацией.....	122
5.2.2 Плавки с временной дискретизацией.....	128
5.2.3 Анализ полученных результатов	135
5.3 Выводы по главе 5	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	143
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ	158

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. В настоящее время мировое производство алюминия достигло объема 59 млн тонн в год [1]. Широкое использование алюминиевых сплавов в различных отраслях народного хозяйства связано с тем, что важнейшим их преимуществом является высокая технологичность.

В промышленно развитых странах мира одной из наиболее применяемых технологий получения деталей из легких сплавов (алюминиевые, магниевые) является литье под давлением. Основными потребителями указанных литых деталей являются: транспортное машиностроение – 50 %; различные отрасли промышленности – 20%; строительство товаров народного потребления – 5% [2].

Литье алюминия под давлением считается одним из наиболее эффективных методов производства благодаря высокой производительности и низкой трудоёмкости. Детали, изготовленные таким методом, практически не нуждаются в последующей механической обработке [3].

Для алюминиевого сплава АК12 при заливке в машину литья под давлением необходимая температура составляет 720 °С, что больше его температуры плавления – 577 °С [4].

Способы доведения алюминиевого сплава до необходимой температуры различны. Для плавки алюминия и его сплавов, в частности используют электрические печи сопротивления и электродуговые печи.

Преимущество первых состоит в возможности получения металла достаточно высокого качества при сравнительно высоком коэффициенте полезного действия. Из недостатков можно отметить низкую производительность данных плавильных агрегатов.

При использовании энергии дугового разряда постоянного тока время расплавления значительно уменьшается [5]. В процессе доводки указанного металла от температуры плавления до температуры разливки, он начинает

интенсивно насыщается атомарным кислородом дуги, что негативно влияет на его физико-механические свойства, в частности, пластичность.

При плавке алюминия дугой с использованием графитированного электрода перегрев приводит к образованию тугоплавких карбидов под дугой [6]. Карбиды алюминия обладая низкой теплопроводностью и высокой тугоплавкостью не позволяют проводить плавку в заданном режиме и процесс плавки нарушается.

Оксид алюминия находится в ванне печи во взвешенном состоянии. Наличие окислов и карбидов резко ухудшает литейные свойства сплавов, а также снижает их антикоррозионные качества.

Отливки, получаемые под давлением, часто имеют тонкие стенки, а окислы и карбиды закупоривают проходы и прекращают доступ жидкого сплава в узкие полости формы, вызывая литейный брак [7].

Известные системы управления плавильными печами надежно осуществляют контроль и управление такими параметрами, как сила тока и уровень напряжения в зависимости от стадии плавки в дуговых печах, количеством затраченной электроэнергии, автоматическим зажиганием дуг, в том числе и при их обрыве, устранением технологических коротких замыканий при обвале шихты, температурой металла, однако не могут вести оперативный контроль за агрегатным состоянием металла в момент плавки, что приводит к перегреву металла или его недоплавлению при переходе на следующую стадию плавки.

Известны плавильные агрегаты, включающие в себя два источника электронагрева: дуговой и нагрев сопротивления, в котором постарались объединить преимущества каждого типа нагрева. Для снижения негативного влияния дуги, необходимо ограничить ее использование при доведении температуры жидкого металла до температуры разливки в указанном плавильном агрегате.

Важно определить момент полного расплавления металла, и после расплавления отключить дуговой нагрев, тем самым снижая возможность

насыщения жидкого металла атомарным кислородом дуги. В настоящее время система определения момента расплавления не реализована. Момент расплавления определяется оператором в процессе плавки, что негативно сказывается на эффективности применения плавильной печи и качестве агрегата для плавки алюминиевого сплава.

Задача определения момента расплавления шихты в электрических печах не является новой задачей. Примером может служить устройство автоматического определения момента расплавления шихты в дуговой сталеплавильной печи, работа которого основана на анализе параметров тока электрической дуги, отражающих ход и состояние процесса плавления, включая момент расплавления шихты. При этом точность и надежность определения момента расплавления шихты недостаточны по причине нечувствительности устройств к состоянию всей массы шихты в электропечи, а чувствительны лишь к локальным участкам массы вблизи электрических дуг [8].

Существует способ определения момента расплавления, который основан на измерении скорости подъема температуры футеровки и на расчете количества электроэнергии, необходимой на расплавление шихты, со статической поправкой, зависящей от размеров электропечи и характеристик переплавляемого материала.

На дуговых электропечах, оборудованных установками электромагнитного перемешивания (ЭМП) ванны определение момента расплавления происходит следующим образом. С помощью обмотки статором ЭМП создается бегущее магнитное поле, проникающее в ванну расплавленного металла. Статор ЭМП совместно с ванной (шихтой или расплавом) фактически представляет собой своеобразный асинхронный двигатель. При плавлении ток статора отражает в динамике степень расплавления шихты и позволяет с достаточной достоверностью определить момент расплавления шихты [9].

Определение момента перехода шихты в жидкую фазу производят также по получению постоянной по времени величины теплового потока через водоохлаждаемый свод при измерении перепада температур воды на входе и выходе и ее расходу. Резкому переходу величины теплового потока от постоянного значения к росту соответствует момент окончания ее расплавления [10].

В индукционных тигельных печах момент полного расплавления шихты определяют по изменению с минуса на плюс второй производной температуры атмосферы печи. Температура газа в печи и расплава не равны друг другу, но их изменения связаны друг с другом, причем эта связь малоинерционна, так как атмосфера печи имеет активный конвективный обмен с шихтой и ванной с металлом. После расплавления всей твердой шихты, скорость роста температуры атмосферы печи начинает повышаться и быстро стабилизируется на определенной величине [11].

Задача определения момента расплавления шихты в электрических печах не является новой. Но в существующих агрегатах точность и надежность определения момента расплавления шихты недостаточны по причине нечувствительности сенсорики к состоянию всей массы шихты, но чувствительности лишь к локальным участкам массы вблизи электрических дуг.

Указанные способы разрабатывались для печей сталеплавильного цеха и применимость их при плавке слитков алюминиевых сплавов невозможно из-за различий технологий плавки и типа подаваемой электроэнергии.

Цели и задачи работы. Целью настоящей работы является разработка метода контроля агрегатного состояния переплавляемого алюминиевого сплава, позволяющего минимизировать отрицательное влияние энергии дуги на него в плавильном агрегате с двумя источниками электронагрева за счет оперативного отключения контура управления дуговым нагревом в момент изменения агрегатного состояния сплава, что позволяет избежать насыщения указанного сплава неметаллическими включениями.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. разработать способ оперативного определения агрегатного состояния слитков алюминиевого сплава в печи с двумя источниками электронагрева;
2. предложить математическое обоснование предложенного способа;
3. предложить алгоритм работы печи на основе разработанного способа определения агрегатного состояния переплавляемого сплава;
4. проанализировать влияние внешних факторов на достоверность определения момента фазового перехода;
5. провести экспериментальную проверку и дать оценку эффективности предложенного способа определения агрегатного состояния на основании анализа результатов тестовых плавов.

Идея работы состоит в создании метода фиксации момента (временного интервала) перехода металла из твердого состояния в жидкое с целью улучшения его качественных характеристик, на основе возможностей технического зрения.

Методология включает изучение процесса изменения поверхности металла при его переходе в состояние расплава, разработку метода контроля этого процесса, разработку математического критерия изменения фазового состояния металла, создание оптического метода и средств, реализующих алгоритм контроля этого изменения и автоматического отключения плавильных печей.

Методы диссертационного исследования: экспериментальные исследования поверхности расплавляемого металла, вычислительные методы оценки достоверности применяемых экспериментальных методов исследования поверхности расплавляемого металла и разработка моделей изменения этой поверхности в процессе плавления, статистическая обработка результатов эксперимента.

Научная новизна исследования:

- разработан и обоснован метод автоматического определения неровности поверхности слитков, уложенных в пространстве печи для выявления момента их расплавления;
- предложены методы определения агрегатного состояния металла, основанные на обработке визуальных данных, характеризующих контролируемую поверхность металла в процессе плавки;
- экспериментально обоснована эффективность предложенных автоматических методов контроля;
- разработана система автоматического управления электрическим режимом плавильного агрегата с двумя источниками электронагрева с использованием интеллектуального датчика контроля агрегатного состояния расплавляемого металла (патент RU №2630160 от 05.09.2017).

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложенный метод контроля фазового перехода металла из твердого агрегатного состояния в жидкое при плавке электрической дугой позволяет автоматически контролировать её наступление по характеристикам изображения, формируемого отраженным от поверхности металла светом.
2. Установлено, что переход из твердого агрегатного состояния в жидкое соответствует уменьшению площади поверхности не менее чем на 30% (от первоначального состояния), что является критерием выработки управляющего сигнала автоматизированной системой управления печи для отключения дугового нагрева.
3. Установлено, что при изменении агрегатного состояния переплавляемого металла критерием для отключения дугового нагрева в автоматизированной системе управления плавильным агрегатом с двумя источниками электронагрева является уменьшение фрактальной размерности контролируемой поверхности металла в процессе плавки на величину не менее 3 %.

4. Предложена автоматическая система оптического контроля агрегатного состояния, основанная на видеофиксации поверхности переплавляемого металла с дальнейшей математической обработкой изображения алгоритмами на основе предложенных методов.

Достоверность научных положений, сформулированных в диссертации, подтверждается:

- корректностью математической модели методикой обработки экспериментальных данных;
- положительными результатами сходимости аналитических и лабораторных исследований;
- полученным патентом на систему автоматического управления электрическим режимом плавильного агрегата, включающую в себя устройство, реализующее способ определения агрегатного состояния по разностным изображениям.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- разработаны методы анализа разностных изображений, изменения площади и фрактальной размерности поверхности металла для оценки времени окончания периода плавки;
- созданы алгоритмы и средства автоматизированного определения момента расплавления металла в печи с двумя источниками электрической энергии.
- даны рекомендации по использованию оптического метода фиксации состояния поверхности в процессе плавки с использованием метода оценки площади на предприятии АО «Специальное конструкторско-технологическое бюро по электрохимии с опытным заводом» (АО «СКТБЭ»), г. Москва.

Апробация работы.

А.А. Бекаревич, М.В. Колистратов, «Разработка автоматизированной системы управления плавильной установкой с двумя источниками электронагрева» // Материалы II-ой международной научно-практической конференции «Инновационное развитие автоматизации, информационных и

энергосберегающих технологий, металлургии и металловедения. Современное состояние, проблематика и перспективы» Сборник научных трудов, электронное издание, ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС, Москва: 2014 г. – стр. 1.9-1.11

А.А. Бекаревич, М.В. Колистратов, Е.А. Калашников, О.Н. Будадин "Определение момента расплава шихты в печи комбинированного электронагрева" // Материалы III-ой международной научно-практической конференции «Инновационное развитие автоматизации, информационных и энергосберегающих технологий, металлургии и металловедения. Современное состояние, проблематика и перспективы» Сборник научных трудов, электронное издание, ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС, Москва: 2015 г. – стр. 1.8-1.11

Бекаревич А.А., Колистратов М.В., Калашников Е.А. "Способ определения агрегатного состояния металла"// Материалы IV-ой международной научно-практической конференции «Инновационное развитие автоматизации, информационных и энергосберегающих технологий, металлургии и металловедения. Современное состояние, проблематика и перспективы» Сборник научных трудов, электронное издание, ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва: 2016 г. – стр. 1.16-1.19

Использование интеллектуального датчика контроля агрегатного состояния металла при проведении плавки в агрегате с двумя источниками электронагрева (доклад). Неделя горняка-2016. Семинар №16 Технические средства (приборы и системы) обеспечения безопасности горных работ. 25-29 января 2016 г.

Способ определения агрегатного состояния металла при плавке (доклад). Неделя горняка-2017. Неделя горняка-2017. Секция 8.4. Технические средства (приборы и системы) обеспечения безопасности горных работ. 23-27 января 2017 г.

Колистратов, М.В. Контроль фазового перехода металл-расплав / М.В. Колистратов, Ю.А. Белобокова // Новые информационные технологии в автоматизированных системах: материалы двадцать первого научно-практического семинара. – М.:ИПМ им. М.В. Келдыша, 2018. – 432 с. С. 46-50

Публикации

Основные положения диссертации опубликованы в 6 печатных работах, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, получен один патент на изобретение.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, приложения, содержит 90 рисунков, 20 таблиц, библиографический список содержит 97 наименований.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ ПЛАВИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ И СПОСОБЫ КОНТРОЛЯ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ РАСПЛАВЛЯЕМОГО МАТЕРИАЛА

1.1 Анализ существующих систем автоматизированного управления процессом плавки в тигельных печах сопротивления

Основной задачей устройств автоматического регулирования температуры в печах сопротивления является обеспечение заданного температурного режима нагрева переплавляемого металла. В ряде случаев необходимо программное регулирование, т.е. изменение температуры печи по заранее заданному закону.

Для поддержания постоянного температурного режима печи или изменения её температуры необходимо варьировать в заданном диапазоне мощность, подводимую к этой печи.

Датчики температуры, используемые в системах регулирования, могут обладать значительной тепловой инерцией, в результате чего отклонения температуры поступают на вход регулятора с запаздыванием. Это увеличивает амплитуду колебаний температуры при позиционном регулировании, а при непрерывном регулировании затрудняет получение переходных процессов приемлемого характера [12].

На качество регулирования температурного режима оказывает влияние место установки датчика в печи, так как температура нагревателей, теплоизоляции и переплавляемого материала, в частности слитков алюминиевого сплава, может быть неодинаковой, в связи с чем при регулировании будет изменяться с различной скоростью.

В зависимости от рабочей температуры, заданной точности ее регулирования, а также динамических характеристик печи и температурного датчика используются различные системы регулирования. По принципу

действия их можно разделить на два класса – дискретные (релейные) и непрерывные [13].

Все промышленные печи сопротивления работают в автоматическом режиме регулирования температуры [14-18], позволяющем приводить мощность печи в соответствие требуемому температурному режиму, что снижает удельный расход электроэнергии по сравнению с ручным регулированием.

Существуют два основных способа регулирования температуры электрической печи сопротивления (ЭПС) [19]:

- квазинепрерывное регулирование, при котором в качестве исполнительных устройств используются тиристорные регуляторы напряжения (РНТО – однофазные и РНТТ – трехфазные),
- позиционное регулирование.

Регулировать рабочую температуру изменением мощности поступающей в печь энергии можно следующими способами:

- с помощью двухпозиционного регулирования (периодическое отключение и подключение печи к питающей сети);
- с помощью трёхпозиционного регулирования (переключение нагревателей печи с последовательного соединения на параллельное, либо со схемы "звезда" на схему "треугольник").

Структурная схема двухпозиционного регулирования температуры ЭПС представлена на рисунке 1.1, где периодическим отключением и включением нагревателей печи управляет коммутационный аппарат (электромагнитный контактор или тиристорный переключатель), использующийся в данной системе в качестве исполнительного устройства. Условия отключения и включения определяются по следующим критериям (θ – значение температуры):

- $\theta > \theta_{OFF}$ (условие отключения),
- $\theta < \theta_{ON}$ (условие включения),

где θ_{OFF} , θ_{ON} – уставки регулятора на отключение и на включение соответственно.

Величина $\Delta\theta = \theta_{OFF} - \theta_{ON}$ называется *зоной нечувствительности* двухпозиционного регулятора. На структурной схеме (рисунок 1.1) регулирующим элементом (РЭ) обозначен релейный элемент с зоной нечувствительности $\Delta\theta$.

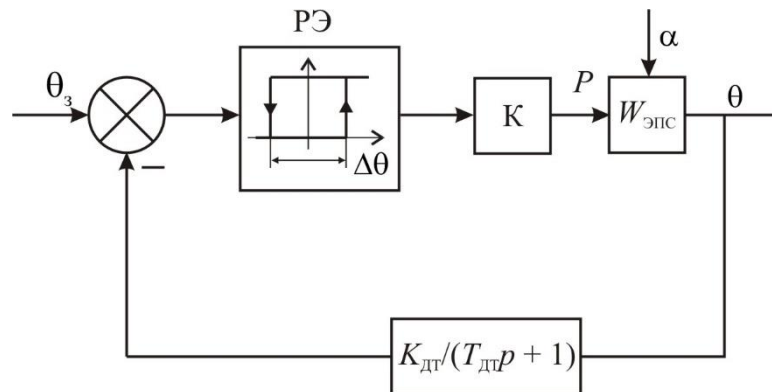


Рисунок 1.1 – Структурная схема двухпозиционного регулирования (θ_3 – задаваемая температура, P – подаваемая мощность, α – возмущающее воздействие, $T_{\text{дт}}$ – постоянная времени датчика температуры, p – оператор Лапласа)

При *квазинепрерывном регулировании* температуры ЭПС в качестве исполнительного устройства используется тиристорный регулятор напряжения с фазоимпульсным или низкочастотным широтно-импульсным управлением [20, 21]. Благодаря значительной инерционности объекта управления в большинстве случаев импульсным характером подачи мощности на нагреватели пренебрегают.

Структурная схема системы непрерывного регулирования температуры ЭПС с пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) законом регулирования представлена на рисунке 1.2.

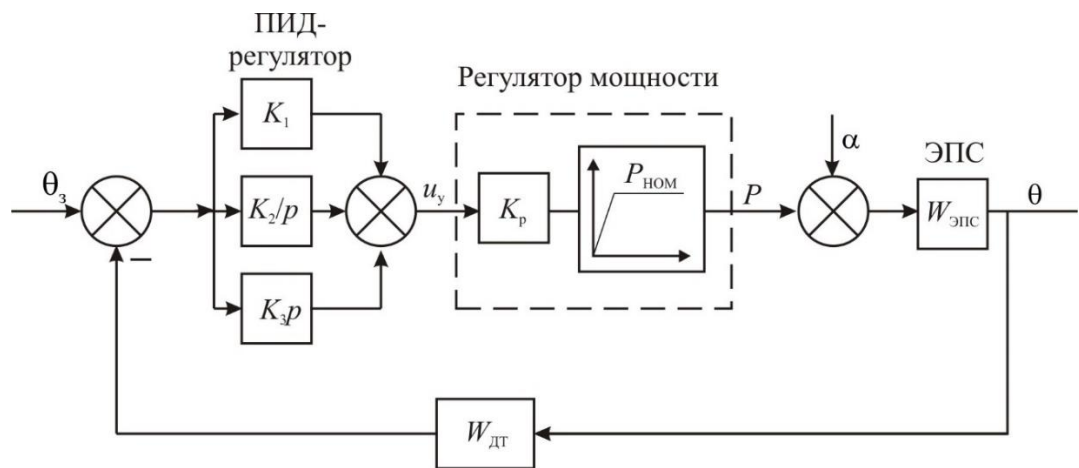


Рисунок 1.2 – Структурная схема системы непрерывного регулирования температуры ЭПС с ПИД-законом регулирования

Регулирование температуры ЭПС осуществляется с помощью изменения мощности, потребляемой нагревателями печи из сети. Поскольку электропечи сопротивления являются объектами со значительной тепловой инерционностью, возможен переход с непрерывного регулирования мощности на позиционное или широтно-импульсное. При импульсном характере вводимой из сети мощности возникают колебания температур нагревателей, футеровки и переплавляемого металла. В установившемся режиме эти колебания носят периодический характер.

С помощью *трёхпозиционного регулирования* при переключении схемы соединения нагревателей со схемы «звезда» на схему «треугольник» изменяется подводимая к печи мощность, снижением которой можно регулировать температуру. Поскольку в этом случае не оказывается вредного влияния на питающую сеть, такой метод регулирования является эффективным с энергетической точки зрения.

С помощью полупроводниковых вентилей осуществляется импульсное регулирование на базе тиристорных регуляторов, периодичность работы которых выбирают в зависимости от тепловой инерционности электропечи. Схема импульсного регулирования мощности печи показана на рисунке 1.3. Выделяют три основных способа импульсного регулирования мощности, потребляемой от сети переменного тока:

1. Импульсное регулирование при частоте коммутации $f_k = 2f_c$ (f_c – частота тока питающей сети) с изменением момента отпирания тиристора (кривые а);
2. Импульсное регулирование с повышенной частотой коммутации $f_k > 2f_c$ (кривые б).
3. Импульсное регулирование с пониженной частотой коммутации $f_k < f_c$ (кривые в).

Путем импульсного регулирования можно получить плавное регулирование мощности в широких пределах почти без дополнительных потерь, обеспечивая соответствие мощности, потребляемой печью, и мощности, подводимой из сети.

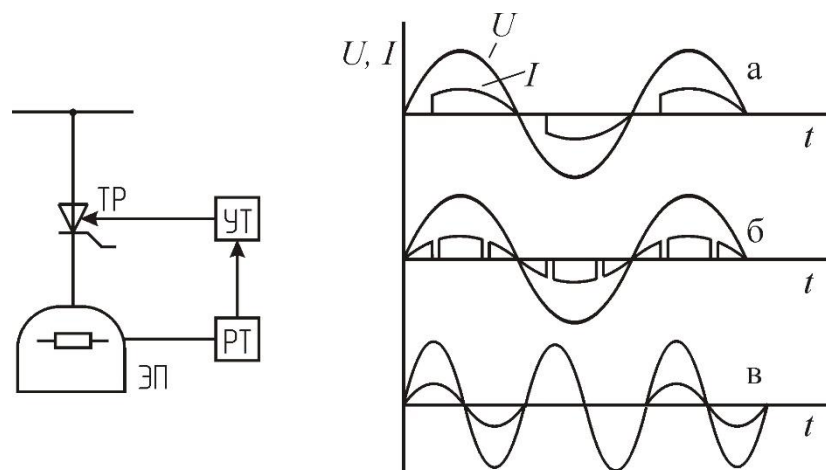


Рисунок 1.3 – Схема импульсного регулирования мощности печи
 ЭП – электродуговая печь, РТ – теплорегулятор, УТ – блок управления тиристорным регулятором, ТР – тиристорный регулятор

Процесс автоматического регулирования температурного режима в ЭПС характеризуется следующими особенностями [22]:

1. Электрическая печь сопротивления с точки зрения управления представляет собой сложный комплекс, состоящий из нагревателя, футеровки, переплавляемого материала и термоэлектрического термометра, связанных друг с другом процессом теплообмена. Каждый из этих компонентов обладает

своей тепловой инерцией, что усложняет расчет тепловых переходных процессов и анализ динамики процесса регулирования.

2. Поверхности нагревателей, переплавляемого материала и футеровки нагреваются не всегда равномерно, поэтому температуры в отдельных частях камеры ЭПС могут сильно различаться. Поэтому от расположения в камере печи рабочего конца термопары могут зависеть устойчивость и качество непрерывного регулирования, регулируемая температура и размах колебаний температуры при позиционном регулировании.

3. Электрическая печь сопротивления является объектом с самовыравниванием. При повышении температуры увеличиваются тепловые потери, поэтому график нагрева носит экспоненциальный характер, в конечном счете, в печи само собой устанавливается положение равновесия [23].

Достоинства печей сопротивления – получение металла достаточно высокого качества и сравнительно высокий коэффициент полезного действия [24].

Но при всех своих достоинствах электропечи сопротивления обладают сравнительно низкой производительностью, продолжительным разогревом печи после остановок и сравнительно высоким расходом электроэнергии от 1980 до 3060 МДж·ч на 1 т металла (от 550 до 850 кВт·ч на 1 т) в зависимости от продолжительности разливки. В печах сопротивления нельзя проводить плавку под флюсами из-за опасности разрушения нагревательных элементов, так как летучие компоненты, выделяющиеся из легкоплавких флюсов, оказывают на них корродирующее воздействие [25, 26].

Более производительными решениями при плавке металла являются дуговые печи постоянного и переменного тока.

1.2 Обзор существующих систем автоматизированного управления процессом плавки в дуговых печах

1.2.1 Обзор методов управления дуговыми печами переменного тока

В задачу автоматического регулятора электрического режима входит поддержание заданного значения вводимой в печь активной мощности с максимально возможной точностью. Эта мощность выделяется на электрических дугах и регулируется путем изменения длины дугового промежутка и переключения ступеней напряжения печного трансформатора. Регулируемой величиной в дуговой печи является полезная активная мощность дуг; при этом контролируются напряжения и токи фаз.

В период расплавления требуется обеспечивать минимум дисперсии тока и быструю ликвидацию эксплуатационных коротких замыканий. В технологические периоды плавки важно иметь высокую точность регулирования и максимально возможную чувствительность, чтобы избежать соприкосновений электродов с жидким расплавом и науглероживания ванны. Возмущения электрического режима в фазе дуговой печи вызываются:

- изменениями длины межэлектродного промежутка из-за движений шихты и конца электрода;
- отклонениями напряжения питающей сети установки от номинального значения;
- изменениями напряжений на дугах и током двух других фаз;
- изменениями сопротивлений магнитопровода;
- переключениями ступеней напряжения под нагрузкой;
- обвалами шихты в период расплавления;
- вмешательствами плавильщика.

На рисунке 1.4 приведена общая для всех промышленных регуляторов функциональная схема. Сигналы от датчиков тока ДТ и напряжения ДН

поступают на блок сравнения БСР, куда также подается сигнал от блока задания БЗ. Сигнал рассогласования с выхода БСР поступает на вход блока регулирования БР, в котором производится предварительное усиление сигнала, формируется статическая характеристика (зона нечувствительности, зона пропорциональности, коэффициент усиления). На вход БР поступает также сигнал от блока обратной связи БОС, обеспечивающий формирование заданного переходного процесса и стабилизацию системы автоматического регулирования. Сигнал с выхода БР усиливается силовым усилителем БСУ и подается на исполнительный механизм ИМ перемещения электрода. При отклонении электрического режима ДСП от заданного электрод перемещается в направлении, соответствующем ликвидации рассогласования [12].

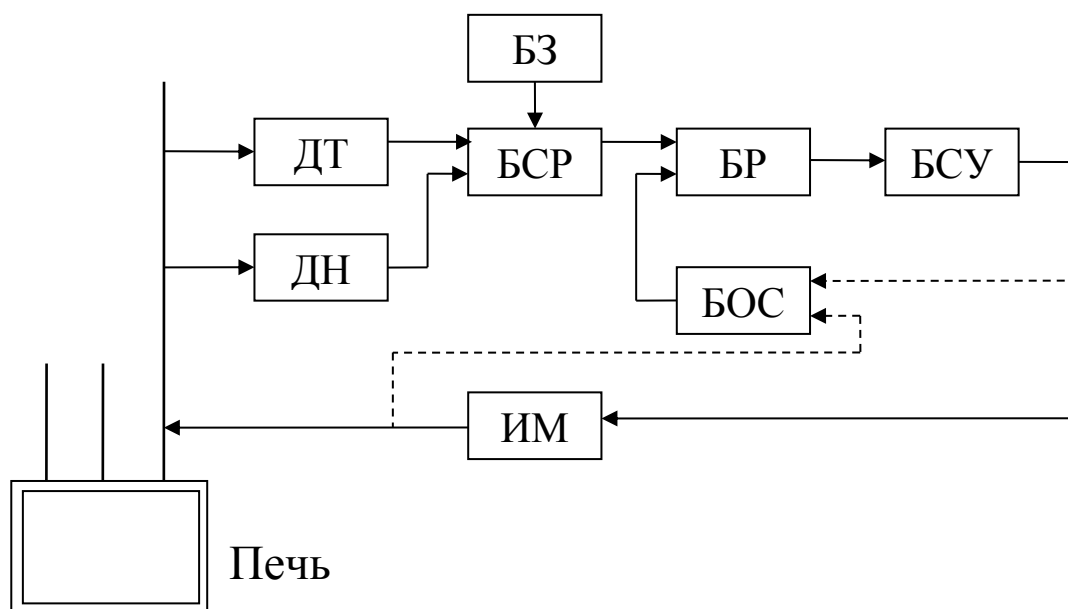


Рисунок 1.4 – Поясняющая схема САР мощности дуговой печи (на одну фазу)

Задание программы для каждого периода плавки складывается из следующих параметров: ступени напряжения электропечного трансформатора; ступени токов электродов; количества электроэнергии, вводимой в печь, или продолжительность интервалов плавки.

Пример управления регулятором в период расплавления металла в дуговой печи приводится ниже [23, 27]. В этом периоде выделены пять стадий:

- зажигание дуг;
- проплавление колодцев;
- стадия закрытых дуг;
- стадия открытых дуг;
- доплавление.

Каждая из этих стадий определяет ограничения на ввод максимальной мощности в печь. Например, из-за близости сводов печи возникают потери мощности и вероятность поломки электрода, поэтому необходимо ввести ограничения при зажигании дуг, проплавлении колодцев и прожигании слишком узких колодцев без образования ванны жидкого металла. При этом в стадии закрытых дуг ограничений на ввод нет. Свечение открытой дуги на стены печи является ограничением на стадиях доплавления и открытых дуг.

Границы стадий фиксируются следующим образом: по заданному заглублению электродов в шихту определяется окончание стадии зажигания дуг, т.е. прохождению заданного расстояния x_0 от момента зажигания дуг тремя электродами (условие $x_1 \geq x_0$; $x_2 \geq x_0$; $x_3 \geq x_0$); по замедлению движения электродов вниз ($v_{1,2,3} \approx v_0 \approx 0$) определяется окончание стадии проплавления колодцев; по уменьшению количества коротких замыканий в единицу времени $N_3 \geq N_0$ (короткие замыкания вследствие обвалов шихты) определяется окончание стадии закрытых дуг; по расходу электроэнергии $W \geq W_4$, требуемой, для расплавления шихты определяется окончание стадии открытых дуг, масса которой известна и по достижению температуры металла заданной величины $T_m \geq T_3$ определяется окончание стадии доплавления и всего периода расплавления.

При плавке алюминиевых сплавов в дуговой печи по указанной выше схеме в области образования колодца происходит перегрев расплава, т.к. приходится прогревать футеровку через расплавляемый металл, а значит расплавлять металл последовательно при наличии жидкой ванны и твердой фазы.

Локальный перегрев жидкого металла приводит к образованию тугоплавких карбидов под дугой. Расплавленный алюминий при перегреве начинает активно насыщаться атомарным кислородом дуги. Наличие окислов и карбидов ухудшает литейные свойства сплавов алюминия [28].

Кислород в алюминиевых расплавах не существует в растворенном виде, а находится в виде неметаллических включений (оксиды алюминия, магния и других металлов, входящих в состав сплавов). В результате взаимодействия кислорода с алюминием и другими компонентами сплава в расплаве образуются нерастворимые соединения, приводящие к появлению в литом металле структурных неоднородностей [29].

Оксидные включения существенно снижают жидкотекучесть алюминия и ухудшают заполняемость литейных форм. По данным [30] жидкотекучесть алюминия, определенная по спиральной пробе, уменьшалась с 265 до 210 мм при изменении содержания Al_2O_3 с 0,03 до 0,06% соответственно (температура литья $700^{\circ}C$). Увеличение содержания в расплаве взвешенных оксидов алюминия приводит к небольшому повышению твердости и резкому измельчению зерна литого металла. Оксидные включения существенно изменяют механические свойства алюминия. Так, удлинение образцов алюминия уменьшилось с 30,6 до 3,0 %, а предел прочности с 70 до 21 МПа при изменении содержания Al_2O_3 с 0,036 до 0,114 %.

Для исключения перегрева металла при плавке дугой необходимо выключать дуговой нагрев при полном расплавлении алюминия.

Задача определения момента полного расплавления металла в электрических печах не является новой. Примером ее решения может служить устройство автоматического определения момента расплавления шихты в дуговой сталеплавильной печи. Его работа основана на анализе параметров тока электрической дуги, отражающих ход и состояние процесса плавки, включая момент расплавления металла. Но поскольку устройство чувствительно лишь к локальным участкам массы вблизи электрических дуг и

нечувствительно к состоянию всей массы шихты в целом, точность и надежность определения момента расплавления является недостаточной [7].

На дуговых электропечах переменного тока, оборудованных установками электромагнитного перемешивания ванны (ЭМП) определение момента расплавления происходит следующим образом. С помощью обмотки статора ЭМП создается бегущее магнитное поле, проникающее в ванну расплавленного металла. Статор ЭМП совместно с ванной (шихтой или расплавом) фактически представляет собой своеобразный асинхронный двигатель. При плавлении ток статора отражает в динамике степень расплавления шихты и позволяет с достаточной достоверностью определить момент полного расплавления металла [8].

Определение момента перехода шихты в жидкую фазу производят также по получению постоянной по времени величины теплового потока через водоохлаждаемый свод при измерении перепада температур воды на входе и выходе и ее расходу. Резкому переходу величины теплового потока от постоянного значения к росту соответствует момент окончания ее расплавления [9].

1.2.2 Обзор методов управления дуговыми печами постоянного тока

Управление процессом плавки производится автоматически с помощью регулятора тока и напряжения.

В системах управления дуговыми печами постоянного тока используются два регулятора, независимые друг от друга: регулятор тока дуги и регулятор перемещения электрода (регулятор длины дуги), поддерживающий заданное значение напряжения на дуге (рисунок 1.5).

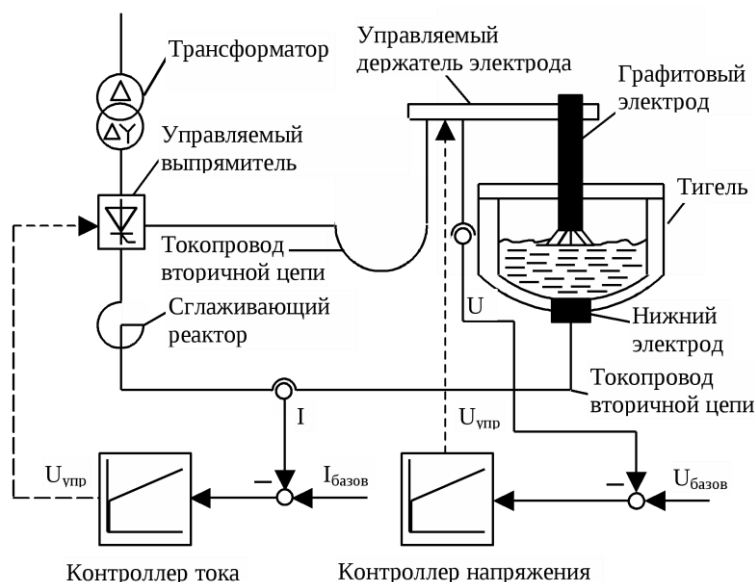


Рисунок 1.5 – Схема дуговой печи постоянного тока [31]

В системе управления отсутствуют внешние связи, объединяющие эти два регулятора [32, 33].

Регулятор тока включает в себя следующие элементы (рисунок 1.6):

- трансформатор с возможностью переключения ступеней напряжения;
- сглаживающий дроссель;
- управляемый тиристорный выпрямитель.

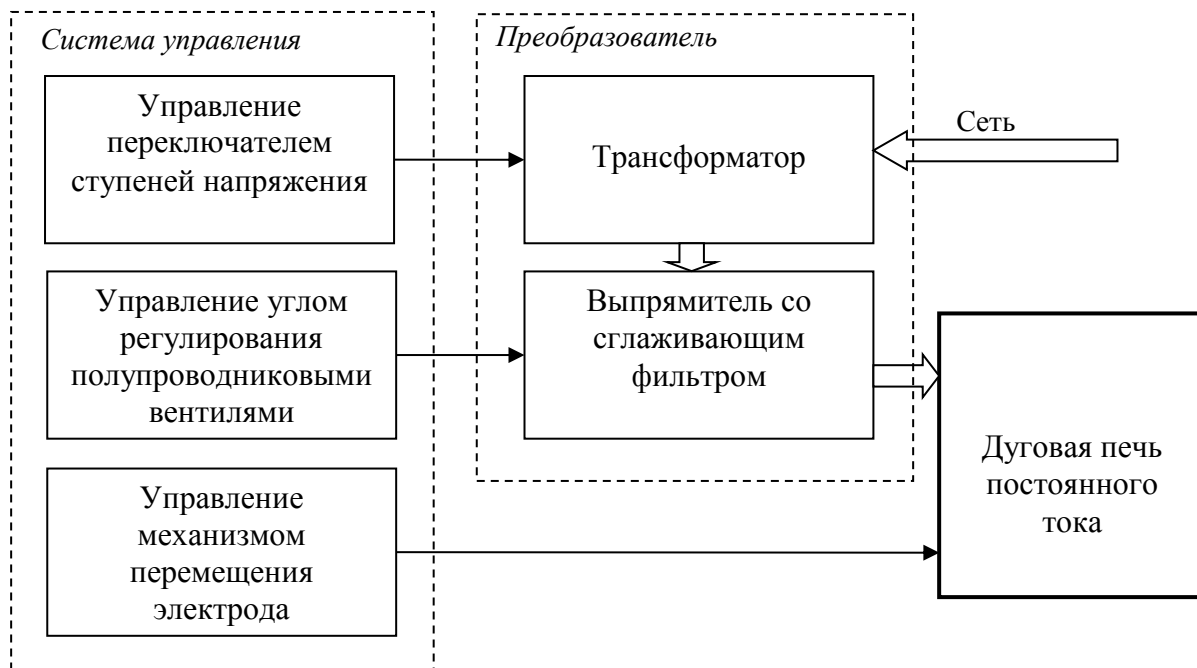


Рисунок 1.6 – Функциональная схема системы автоматического управления (САУ) дуговой печи постоянного тока

Существуют источники питания печей в виде двух одинаковых по параметрам мостовых (или нулевых) схем выпрямления. Это позволяет в период закрытого горения дуги работать на двух последовательно включенных местах с максимальным напряжением холостого хода, а в период открытого горения дуги переключать мосты параллельно друг другу, получая минимальное напряжение и большой ток [33, 34].

Регулятор перемещения электрода образован электромеханическим или электрогидравлическим механизмом и содержит обратную связь по напряжению на печи. Сигнал обратной связи снимается с неподвижных элементов короткой сети и включает в себя не только непосредственное напряжение дуги, но и падение напряжения на подводящих гибких кабелях и находящихся на печи подовом и сводовом токоподводах. Так как сопротивления этих элементов известны, регулятор вносит необходимые поправки в измеренное напряжение дуги и в процессе работы поддерживает заданное напряжение [35, 36].

Система автоматического управления позволяет оператору определять моменты времени окончания периодов плавки на основе контроля вводимой удельной энергии и ее сравнения с расчетным значением и осуществлять регулирование мощности дуги при постоянном задании по току тиристорного выпрямителя, изменяя напряжение (длину дуги) перемещением электрода. Соответственно, основные функции САУ следующие:

- расчет вводимой удельной электроэнергии, сравнение ее с заданным значением и выдачей команды оператору;
- контроль напряжения на дуге, сравнение его с заданным и выдача команды оператору на перемещение электрода;
- контроль температуры стен футеровки и жидкого металла с выдачей команд оператору;
- визуальный контроль на цифровых индикаторах удельного расхода электроэнергии (непрерывного), температуры стен футеровки и жидкого металла.

Независимо друг от друга работающие регуляторы тока и напряжения позволяют более эффективно, по сравнению с печами ДСП, дозировать тепловую нагрузку на футеровку во все периоды плавки [5, 37-41].

1.3 Методы определения агрегатного состояния в печи с двумя источниками нагрева

В работе [42] впервые описан плавильный агрегат с двумя источниками электронагрева, обладающий достоинствами дуговой печи постоянного тока и нагрева сопротивлением. Там же приводятся стадии работы этого агрегата.

Сначала включают нагреватели и доводят температуру футеровки, например, до 700°C в стационарном режиме. Затем загружают слитки так, чтобы они образовывали теплотехнически «толстое» тело; включают дугу и очень быстро греют его, благодаря высокой теплопроводности алюминия, без образования жидкой ванны при допустимом токе. Это позволяет быстро расплавить шихту, после чего дугу отключают и переходят в стационарный режим нагрева сопротивлением. Более подробно технология плавки описана в главе 4 данной диссертационной работы.

Момент автоматического перехода из стадии плавки дугой к стадии плавка сопротивлением реализован не был и определялся плавильщиком на основании показаний счетчика электрической энергии.

Также в крышке печи плавильного агрегата с комбинированным электронагревом находится смотровое окно, позволяющее визуально отслеживать состояние переплавляемого металла.

Для определения момента расплавления можно использовать методы, основанные на фиксации температуры металла или его сплава. Можно считать, что металл расплавился при достижении температурного значения, превышающего температуру его плавления.

Другим способом определения момента расплавления является определение характера поверхности слитков. В процессе плавки поверхность слитков меняется, металл стекает в зазоры между ними. При полном расплавлении поверхность переплавляемого металла становится однородной.

Рассмотрим возможные способы определения момента полного расплавления и проведём их сравнительный анализ.

Фиксация температуры переплавляемого металла термопарой. Зная температуру плавления переплавляемого сплава, можно определить, когда он начинает менять свое агрегатное состояние. Однако фиксация непосредственной температуры слитков при плавке связана с некоторыми трудностями.

Это связано с необходимостью обеспечения непосредственного контакта термопары с металлом. Термопары при измерении высоких температур помещаются в защитный огнеупорный кожух, что, в свою очередь, увеличивает их тепловую инерцию. При измерении температуры печи термопары фиксируются в футеровке, которая по технологическому процессу в печи комбинированного нагрева на первом этапе прогревается до 700 °С. При этом встроенная в футеровку термопара будет измерять температуру именно футеровки, а не расплавляемого металла. Также существенным недостатком такого способа измерения непосредственной температуры переплавляемого металла является сложность обеспечения плотности прилегания слитка алюминиевого сплава и горячего спая термопары. Поскольку слитки имеют вытянутую трапециевидную форму, то при загрузке их в печь возле ее внутренних стенок возникнут воздушные карманы, в которых температура будет выше, чем температура переплавляемых слитков. Это не позволит достоверно оценить температуру переплавляемого сплава.

Способ определения температуры металла погружением термопары в защитном кожухе в жидкий расплав в процессе плавки, применяющийся в крупных металлургических печах, не подходит для решения поставленной

задачи, поскольку температуру алюминия необходимо определять до его расплавления.

Определение температуры алюминия по косвенным признакам, таким, как температура воздушного пространства печи в процессе плавки, также не подходит для решения задачи, поскольку из-за перемешивания воздуха трудно установить зависимость его температуры от температуры металла. Как было описано выше, температура футеровки поддерживается выше температуры плавления, поэтому выделить изменение температуры от металла не представляется возможным.

Фиксация температуры переплавляемого металла пирометром. Принцип работы пирометра основан на фиксации теплового излучения от измеряемого объекта. При непосредственном визировании пирометра на слитки и определении их температуры возникают несколько проблем.

Для точного определения температуры необходимо знать коэффициент излучения объекта. Его можно определить по таблице коэффициентов излучения, которая находится в конце инструкции по использованию конкретного пирометра, либо посредством сравнительного измерения контактным термометром (т.е. меняя коэффициент излучения, заложенный в пирометр до совпадения с показателями контактного термометра).

Инфракрасное (ИК) измерение является поверхностным измерением: если на поверхности объекта измерения имеется грязь, пыль, и т.п., то будет измеряться температура только верхнего слоя поверхности, например, температура грязи [43].

Излучательная способность тел меняется в зависимости от температуры и на диапазонах от 300 до 900 градусов ошибка может быть в 1,5 и более раз.

Нельзя измерить температуру объектов через прозрачные предметы (стекло, пленку), поскольку по факту будет измерена температура поверхности стекла. Стекло, прозрачное в видимом диапазоне, совершенно непрозрачно для ИК-излучения, поэтому монтаж пирометра необходимо производить внутри плавильной камеры.

На результаты пирометрических измерений температуры металлических поверхностей влияет качество обработки поверхности образца и апертура ИК-пирометра [44].

Определение коэффициента излучения поверхности вызывает определенные трудности. Как известно, на значение этого коэффициента влияют следующие факторы: агрегатное состояние вещества (твердое, жидкое, газообразное); состояние поверхности (полированная, матовая, шероховатая, пористая); длина волны излучения или участок спектра, наличие диффузноизлучательного характера поверхности; угол излучения участка поверхности объекта относительно нормали. Коэффициент излучения характеризует не конкретное вещество или материал, а состояние и свойства лишь тонкого слоя поверхности объекта в определенных условиях в процессе измерения пирометром с соответствующими спектральными свойствами [45, 46].

Возможен способ визирования пирометра на стык металл-футеровка. При переходе твердого металла в жидкое агрегатное состояние, уровень жидкого металла становится ниже верхней кромки нерасплавленного металла. Таким образом пирометр, завизированный на кромку металла после его расплавления, начинает измерять температуру футеровки, которая поддерживается на более высоком уровне, чем температура металла (рисунок 1.7).

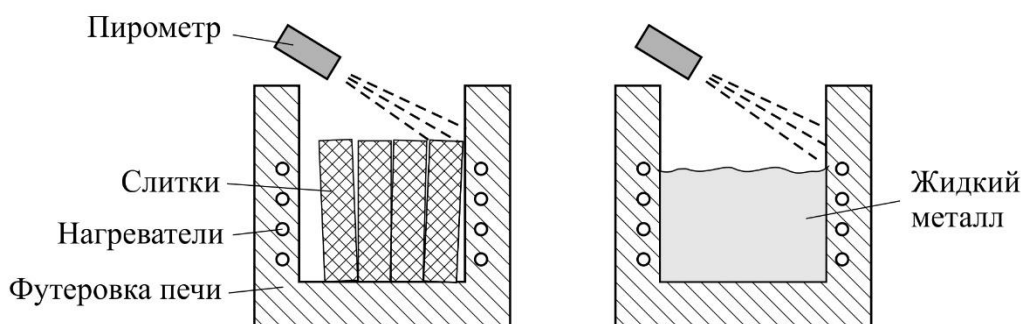


Рисунок 1.7 – Измерение температуры пирометром с визированием на границу металл-футеровка

Сложность состоит в визировании пирометра на границу раздела и необходимости перестройки его положения при изменении формы переплавляемых слитков и способа их укладки.

Еще одна проблема связана с отражательной способностью алюминия. Тепловое излучение так же, как и видимое, отражается от зеркальных поверхностей и может быть ошибочно интерпретировано как тепловое излучение самой измеряемой поверхности [47].

Фиксация температуры переплавляемого металла тепловизором.

В случае использования тепловизионной техники возникают проблемы, аналогичные проблемам измерения температуры пирометрами: влияние отражательной способности алюминия и невозможность проводить съемку поверхности через стекло [48, 49].

Способ бесконтактного измерения температуры поверхности нагретых тел.

Известен способ определения температуры по анализу изображения поверхности металла. Как указано в [50]: «цветное изображение объекта разлагают на три цветовые компоненты – красную, зеленую и синюю. Затем преобразуют каждую компоненту в цифровую форму. Цифровые значения компонент сопоставляют с эталонными их значениями по температуре в градусах в каждом элементе изображения и определяют температуру на поверхности объекта по ближайшим эталонным значениям». Метод базируется на свойстве металла изменять цвет свечения при нагреве его до высокой температуры. Свечение металла (в нашем случае слитков алюминиевого сплава) зафиксировать не представляется возможным из-за свечения дуги. Применение светофильтра на смотровом окне также затрудняет процесс сопоставления значения цветовой компоненты изображения с температурой поверхности.

Лазерное сканирование поверхности. Метод позволяет получить трехмерное представление поверхности переплавляемых слитков алюминия.

При сканировании поверхности формируется облако точек, представляющее собой множество точек, полученных в результате 3D-сканирования объекта.

Нормальное функционирование лазерного сканера возможно при температуре не более 55°C [51], что вынуждает помещать его вне рабочей камеры печи и проводить сканирование через смотровое окно, закрытое стеклом для соблюдения герметичности.

По принципу работы лазерного сканера лазерный пучок исходит из излучателя, отражается от поверхности объекта и возвращается в приемник. В случае сканирования стекла или иной блестящей поверхности лазерный пучок отражается тем же углом, под которым он попал на стекло, и не возвращается в приемник [52]. Таким образом лазерное сканирование через стекло смотрового окна затруднено. Кроме того, существующее программное обеспечение сканеров не позволяет динамически отслеживать и фиксировать изменения поверхности. Это связано с тем, что результаты сканирования сохраняются на внешний носитель информации или, в зависимости от модели сканера, передаются на компьютер со специализированным программным обеспечением, поставляемым вместе со сканером.

1.4 Выводы по главе и постановка задач исследования

1. Существует задача синхронизации двух источников электронагрева в плавильном агрегате для плавки слитков алюминиевого сплава, связанная с необходимостью отключения электрической дуги в момент перехода металла в жидкое агрегатное состояние.

2. Смену агрегатного состояния возможно зафиксировать по достижению температуры плавления алюминиевого сплава. Измерение значения температуры с помощью термопары затруднено ввиду сложности обеспечения плотного ее прилегания к расплавляемым слиткам.

3. Использование пирометров для определения температуры смены фазового состояния может приводить к неверной интерпретации результатов из-за возможной фиксации отраженного от слитков теплового поля дуги.

4. Использование методов неразрушающего контроля для анализа поверхности слитков в процессе плавки невозможно из-за наличия стекла на смотровом окне в сводовой крышке печи. Ультразвуковое излучение будет отражаться от поверхности стекла, тепловизионная съемка покажет исключительно температуру стекла, а не слитков в пространстве печи.

5. Существующие системы управления не могут определять агрегатное состояние расплавляемого материала (алюминиевого сплава) в момент расплавления всей садки; не отключают контур управления дугой в момент полного расплавления – это приводит к насыщению расплава тугоплавкими карбидами.

Таким образом для достижения цели диссертации необходимо решить следующие задачи:

1. разработать способ оперативного определения агрегатного состояния слитков алюминиевого сплава в печи с двумя источниками электронагрева;
2. предложить математическое обоснование предложенного способа;

3. предложить алгоритм работы печи на основе разработанного способа определения агрегатного состояния переплавляемого сплава;
4. проанализировать влияние внешних факторов на достоверность определения момента фазового перехода;
5. провести экспериментальную проверку и дать оценку эффективности приложенного способа определения агрегатного состояния на основании анализа результатов тестовых плавов.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ МОМЕНТА РАСПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПЛАВКЕ

Предлагается новый способ фиксации фазового перехода металл-расплав на основании обработки изображений поверхности, полученных с помощью камеры, работающей в видимом спектре.

Изображение формируется за счет отражения света, излучаемого дугой при плавке, от поверхности слитков алюминиевого сплава, расположенных в пространстве печи. В связи с тем, что электрическая дуга является источником с высокой яркостью излучения, на смотровое окно установлен светофильтр с фиксированным уровнем светопропускания. Это позволяет различать детали поверхности, в частности промежутки между слитками. Кроме того, наличие светофильтра снижает риск повреждения зрения оператора плавильной установки, в случае непреднамеренного взгляда на смотровое окно, в процессе плавки дугой.

2.1 Анализ разностных изображений при расплавлении

У алюминиевых сплавов высокий коэффициент отражения, порядка 0,9 для длин волн видимого спектра (рисунок 2.1). Температура сравнительно слабо влияет на отражательную способность. Возникающая в результате окисления поверхностная оксидная пленка уменьшает ее на 10–15% [53].

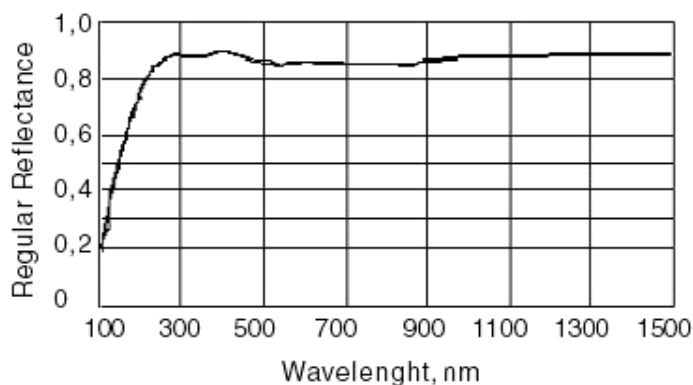


Рисунок 2.1 – Коэффициент отражения алюминия [54]

(*Regular Reflectance* – отражательная способность, *Wavelength, nm* – длина волны, нм)

При наличии углублений падающий свет многократно отражается от стенок металла, каждый раз уменьшая свою интенсивность (рисунок 2.2) из-за конечного значения коэффициента отражения. Таким образом впадины и углубления на изображении будут представлены с меньшим контрастом относительно остальной поверхности.

Условимся, что коэффициент отражения алюминия равен 80% (соответственно, коэффициент поглощения 20%). Рассчитаем долю света после каждого отражения в случае взаимного отражения от параллельных стенок материала алюминиевых слитков (таблица 2.1).

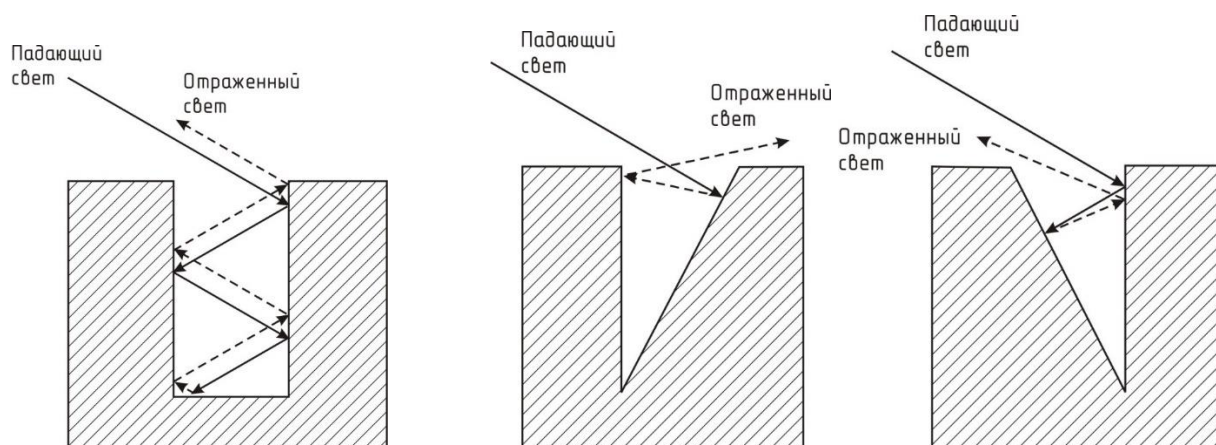


Рисунок 2.2 – Пример поведения светового луча в углублении материала с конечным коэффициентом отражения

Таблица 2.1 – Доля выходящего из углубления света

Количество отражений	Доля света
1	0,8
2	0,64
3	0,512
4	0,4096
5	0,3277
...	...
10	0,1074

Из таблицы следует, что чем глубже впадина между слитками, тем меньше света выходит наружу. Таким образом впадины и углубления на изображении будут представлены с меньшим контрастом относительно остальной поверхности.

На рисунке 2.3 показаны смоделированные слитки алюминия, уложенные в пространство печи, с выставленным боковым освещением (аналог свечения дуги), на рисунке 2.4 – уложенные слитки, подготовленные для плавки.

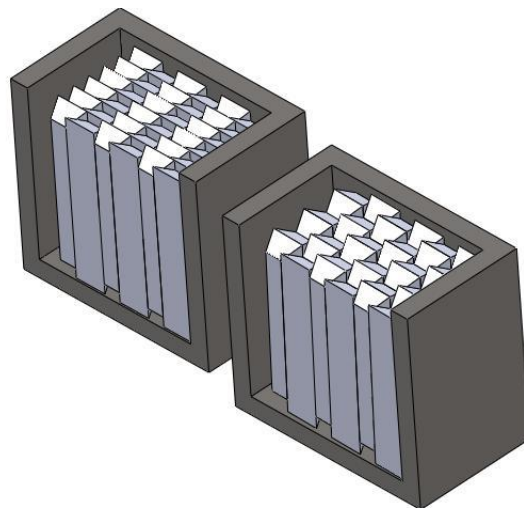


Рисунок 2.3 – Модель слитков в программе *SolidWorks*, расположенных в пространстве печи



Рисунок 2.4 – Пример слитков алюминия

По причинам, указанным ранее области между слитками кажутся более темными, чем их видимая поверхность.

В момент расплавления металл начинает стекать вниз и подобно жидкости занимать все полости. Поверхность металла становится равномерной. Контрастность изображения выравнивается и перестает изменяться. Окончание расплавления (переход всего расплавляемого материала в жидкое агрегатное состояние) можно оценить по разности изображений, снимаемых через заданные промежутки времени. В начальный момент разностные изображения будут «пустые», т.к. материал будет нагреваться до температуры плавления, не изменяя своей формы. При достижении температуры плавления часть металла будет стекать вниз и соответственно полости будут заполняться. Свету, попадавшему в полость, потребуется меньшее количество отражений и на изображении полости будут выглядеть светлее. На разностном бинаризованном изображении проявятся участки (белые области) указывающие на изменившиеся фрагменты изображения поверхности металла. В конечный момент плавления все полости будут заполнены и поверхность металла станет однородной. На бинаризованном разностном изображении белые области пропадут, что зафиксируется аппаратурой.

Для качественной оценки изображений используем понятие яркостной контрастности [55]:

$$C = \frac{2\sigma}{Y_{\max}},$$

где σ – среднеквадратичное отклонение яркости пикселей изображения;

Y_{\max} – максимальное значение яркости изображения.

C изменяется в диапазоне $[0,1]$. Значение 0 соответствует однотонному изображению, значение 1 — максимально контрастному.

Протекание процесса перехода металла из твердого агрегатного состояния в жидкое, а именно изменения формы слитков возможно зафиксировать программным способом, используя алгоритмы анализа, базирующиеся на подсчете площади локальных областей на разностном изображении. Под разностным изображением в данном случае понимается изображение, значение каждого пикселя которого формируется вычитанием яркости соответствующих пикселей двух изображений поверхности переплавляемого металла, разделенных временным промежутком.

Для корректного вычитания двух изображений, содержащих в себе яркость поверхности переплавляемого материала, необходимо исключить из них шумовую составляющую. Оценку уровня шума предлагается проводить следующим образом. В начальный период плавки (период до расплавления), например, в течение первых 120 секунд проводится фиксация максимального значения разности при каждой итерации вычитания двух последовательных изображений. В конце заявленного периода вычисляется размер порога, который будет использоваться при дальнейшей обработке разностных изображений в качестве порога бинаризации. Превышение порога будет означать начало изменения светового потока от слитков (начало расплавления), вследствие изменения их формы.

Ниже приведено формализованное описание предложенной процедуры.

Вычитание изображений $y(i, j, t) = |f(i, j, t) - f(i, j, (t-1))|$, здесь $f(i, j, t)$ и $f(i, j, (t-1))$ – матрицы содержащие значения яркостей пикселей изображений полученных в момент времени t и $(t-1)$ соответственно; $y(i, j, t)$ – матрица содержащая разностные значения пикселей; i, j – координаты соответствующих пикселей.

Получение бинарного разностного изображения $g(i, j, t)$ с использованием порога яркости *threshold* к элементам изображения $y(i, j, t)$:

$$g(i, j, t) = \begin{cases} 1, & \text{если } y(i, j, t) > \text{threshold} \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases},$$

где $\text{threshold} = \max_{t \in T_n} (\max y(i, j, t))$, T_n – промежуток времени в течение которого фиксируется уровень шума.

Для определения площади различающихся участков исходных изображений $f(i, j, t)$ и $f(i, j, (t-1))$ проведем подсчет ненулевых значений разностного бинарного изображения: $S(t) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} g(i, j, t)$.

Введем индикатор $R(t)$, показывающий начало изменения поверхности металла в процессе смены его агрегатного состояния ($R(t) = 1$ – изменение началось):

$$R(t) = \begin{cases} 0, & S(t) = 0 \\ 1, & S(t) > 0 \end{cases}.$$

На основании анализа динамики изменения поверхности определяется момент окончания переплава с присвоением переменной *result_R* единичного значения

$$\text{result_R} = \begin{cases} 1, & \text{если } (R(t-1) = 1) \text{ и } (S(t) = 0) \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}.$$

При $\text{result_R} = 1$, работа алгоритма заканчивается.

2.2 Оценка площади поверхности расплавляемого металла в период плавки

Если рассматривать изображение как поверхность, где более светлые области изображения находятся выше относительно других областей

(рисунок 2.5), то можно оценить степень изменения изображения по площади поверхности, формируемой отражаемым от поверхности светом.

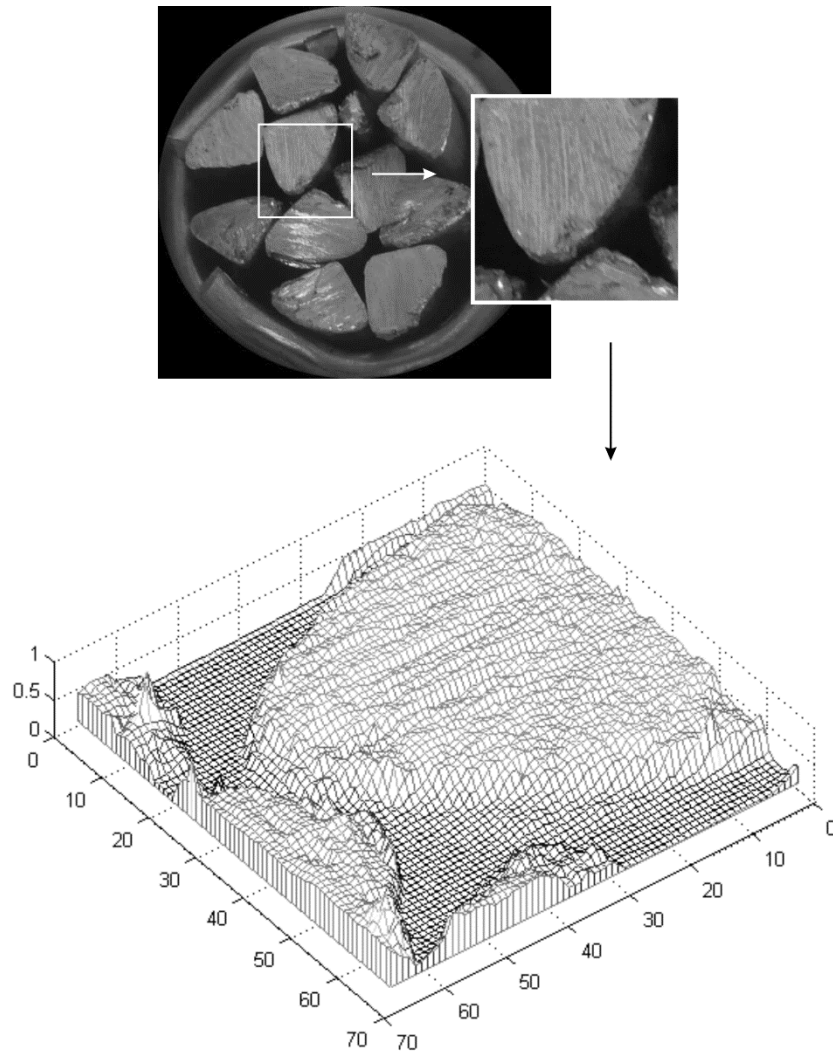


Рисунок 2.5 – Изображение (а) и его трехмерное представление (б)

Предложены следующие способы определения площади:

- метод триангуляции;
- метод расщепления поверхности;
- метод площадок.

Для пояснения методов рассмотрим простейшее изображение, состоящее из 9 пикселей. Каждый пиксель представляется в виде узла на координатной сетке [56], расположенный на высоте пропорциональной его яркости (рисунок 2.6).

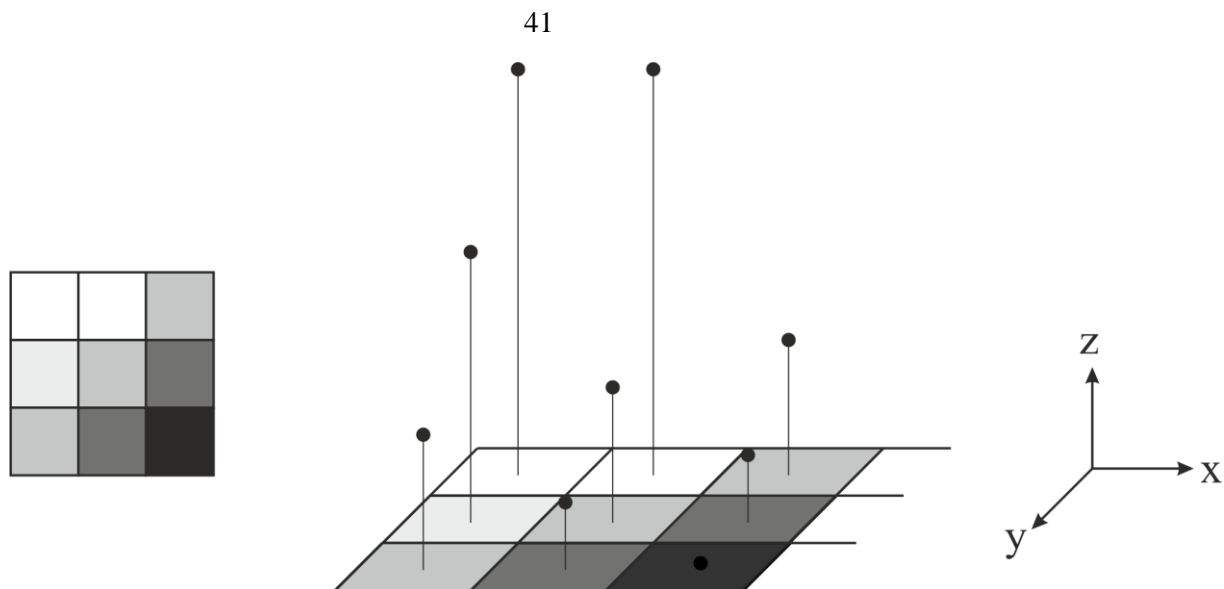


Рисунок 2.6 – Изображение и его представление на координатной плоскости

Метод триангуляции заключается в следующем. Берутся четыре соседних узла массива-изображения разбиваются на две тройки, а затем проводится вычисление площади получившихся треугольников (соответственно S_1 и S_2). Затем найденные площади складываются [57, 58]. Существует 2 способа формирования треугольников (рисунок 2.7). Ниже представлен алгоритм вычисления и сравнения заявленных способов.

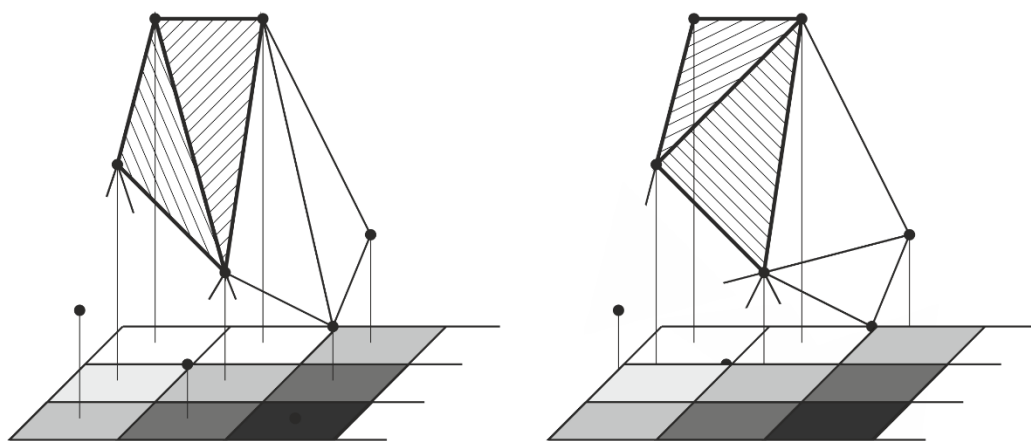


Рисунок 2.7 – Способы формирования треугольников при рассмотрении метода триангуляции

Зададимся координатами вершин рассматриваемого треугольника, сформированного соседними пикселями изображения (рисунок 2.8).

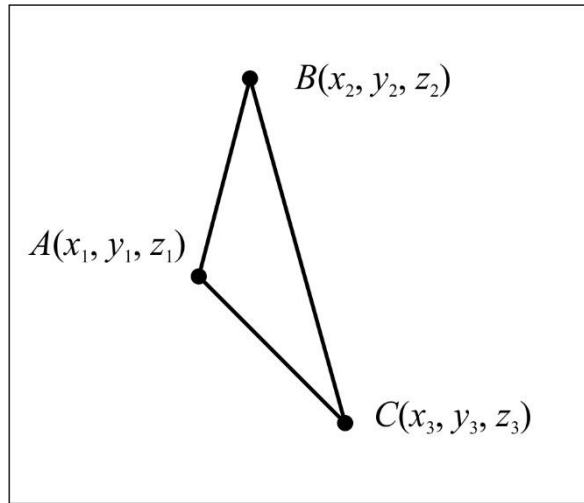


Рисунок 2.8 – Координаты точек (x и y – координаты заданной точки на изображении, z – значение яркости точки)

Векторы образующие стороны треугольника:

$$AB = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$$

$$BC = \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2 + (z_2 - z_3)^2}$$

$$AC = \sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2 + (z_1 - z_3)^2}$$

Для определения площади локальных треугольников воспользуемся формулой Герона:

$$S = \sqrt{(p - AB)(p - AC)(p - BC)p} ,$$

где $p = \frac{AB + AC + BC}{2}$ – полупериметр заданного треугольника.

Т.к. мы будем иметь дело с изображением, и расстояние между соседними точками равняется единице, выражения можно упростить:

$$AB = \sqrt{1 + (z_1 - z_2)^2},$$

$$BC = \sqrt{2 + (z_2 - z_3)^2},$$

$$AC = \sqrt{1 + (z_1 - z_3)^2},$$

где

$$z_1 = z(x_1, y_1) = z(x, y),$$

$$z_2 = z(x_2, y_2) = z(x, y + 1),$$

$$z_3 = z(x_3, y_3) = z(x + 1, y).$$

Если брать равноудаленные точки, то выражения для вычисления расстояния между точками примет следующий вид:

$$AB = \sqrt{step^2 + (z(x, y) - z(x, y + step))^2},$$

$$BC = \sqrt{2 \cdot step^2 + (z(x, y + step) - z(x + step, y))^2},$$

$$AC = \sqrt{step^2 + (z(x, y) - z(x + step, y))^2}.$$

здесь $step$ – количество пикселей между ключевыми точками ($step = 1, 2, 3, \dots$).

Площадью поверхности будем считать сумму площадей всех локальных треугольников, образованных одним из способов (см. рисунок 2.7).

$$S_t = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (S_1 + S_2),$$

здесь M и N количество пикселей изображения по осям x и y соответственно.

Метод «площадок» заключается в том, что усредняется значение четырех соседних пикселей, образуя так называемую площадку на высоте h_{xy} (рисунок 2.9).

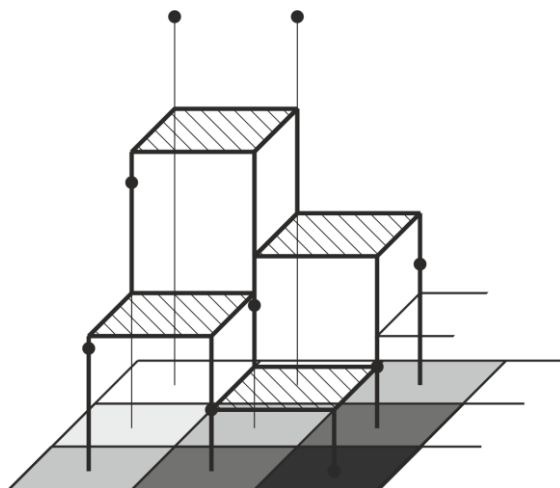


Рисунок 2.9 – Формирование площадок по известным значениям
уровня освещенности заданных пикселей

Площадь, формируемая площадками:

$$S_h = M \cdot N .$$

Кроме того, существует вертикальная область между горизонтально расположенными соседними площадками. Если для расчета берутся соседние пиксели (размер площадки 1x1), площадь будет равна:

$$S_{h-h} = \sum_{x=0}^{M-2} \sum_{y=0}^{N-2} |h_{xy} - h_{x+1,y}| + |h_{xy} - h_{x,y+1}| ,$$

где

$$h_{xy} = \frac{z(x, y) + z(x+1, y) + z(x, y+1) + z(x+1, y+1)}{4} ;$$

$$h_{x+1,y} = \frac{z(x+1, y) + z(x+2, y) + z(x+1, y+1) + z(x+2, y+1)}{4} ;$$

$$h_{x,y+1} = \frac{z(x, y+1) + z(x+1, y+1) + z(x, y+2) + z(x+1, y+2)}{4} .$$

Принимая шаг между ключевыми пикселями равным $step$, выражение для высоты расположения площадки будет иметь вид:

$$h_{xy} = \frac{z(step \cdot x, step \cdot y) + z(step \cdot x + step, step \cdot y) + z(step \cdot x, y + step) + z(x + step, y + step)}{4}$$

Соответственно площади:

$$S_h = \sum_{x=0}^{\frac{M-1}{step}} \sum_{y=0}^{\frac{N-1}{step}} step^2 ,$$

$$S_{h-h} = \sum_{x=0}^{\frac{M-1}{step}-1} \sum_{y=0}^{\frac{N-1}{step}-1} (|h_{xy} - h_{x+step,y}| + |h_{xy} - h_{x,y+step}|) \cdot step.$$

Площадь поверхности будет равна $S_p = S_h + S_{h-h}$.

Метод расщепления поверхности заключается в нахождении длины профиля изображения с последующим суммированием полученных длин. Предлагается делать замеры по горизонтальным и вертикальным сечениям (рисунок 2.10).

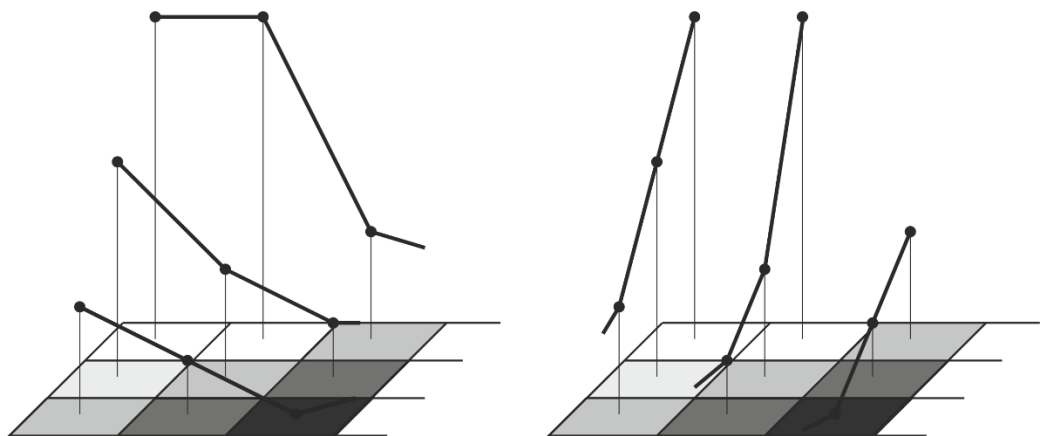


Рисунок 2.10 – Формирование профилей по исходным точкам изображения

Длина конкретного горизонтального профиля L_y и площадь S_g сформированная из этих профилей:

$$L_y = \sum_{x=0}^{N-1} \sqrt{1 + (z(x, y) - z(x+1, y))^2},$$

$$S_g = \sum_{y=0}^{M-1} L_y.$$

Если расчет вести не по соседним точкам, а находящимся друг от друга на расстоянии $step$, выражение площади будет иметь вид:

$$S_g = \sum_{x=0}^{\frac{N-1}{step}} \sum_{y=0}^{\frac{M-1}{step}} \sqrt{step^2 + (z(x, y \cdot step) - z(x+step, y \cdot step))^2},$$

$$S_v = \sum_{x=0}^{\frac{N-1}{step}} \sum_{y=0}^{\frac{M-1}{step}} \sqrt{step^2 + (z(x \cdot step, y) - z(x \cdot step, y+step))^2}.$$

Здесь S_g и S_v – площади, рассчитанные по горизонтальным и вертикальным профилям соответственно.

Площадью поверхности по данному методу будем считать средневзвешенное значение площадей, указанных выше:

$$S_{pr} = (S_g + S_v)/2.$$

Для сравнительной оценки предложенных методов определения площади введем понятие приведенной площади S_0 :

$$S_0 = \frac{S}{MN},$$

где S – вычисленная площадь поверхности;

M, N – линейные размеры изображения по вертикали и горизонтали, пиксели.

Проведем расчет приведенной площади для следующих типов изображения:

– однотонное изображение (интенсивность всех пикселей одинаковая), $f(x, y) = \Delta$;

– шашечки (иглы) $f(x, y) = \begin{cases} 1, \text{если } x \cdot y - \text{четное число} \\ 0, \text{в остальных случаях} \end{cases}$;

– градиент $f(x, y) = x \cdot \Delta$;

– угловой градиент $f(x, y) = (x+y) \cdot \Delta$.

Однотонное изображение (метод триангуляции)

Рассчитаем значение площади. Длины векторов образованные соседними пикселями $AB = \sqrt{1 + (z_1 - z_2)^2} = 1$, $BC = \sqrt{2 + (z_2 - z_3)^2} = 1,41$,

$AC = \sqrt{1 + (z_1 - z_3)^2} = 1$. Полупериметр $p = \frac{AB + AC + BC}{2} = 1,71$, площадь

треугольника $S_1 = \sqrt{(p - AB)(p - AC)(p - BC)p} = 0,5$. Площадь поверхности:

$$S_t = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (S_1 + S_2) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} 1 = M \cdot N.$$

Приведенная площадь $S_{t0} = \frac{S_t}{M \cdot N} = 1$.

Однотонное изображение (метод площадок)

В случае однотонного изображения площадь между площадками равна нулю ($S_{h-h} = 0$), т.к. нет разницы высоты между ними. В этом случае $S_p = S_h = MN$, $S_{p0} = S_p/MN = 1$.

Однотонное изображение (метод рассечения)

Длина одного сечения $L_y = \sum_{x=0}^{N-1} \sqrt{1 + (z(x, y) - z(x+1, y))^2}$, т.к. значения яркости ($z(x, y)$) одинаково на всем диапазоне, $L_y = N$. Соответственно площадь по горизонтальным профилям равна $S_g = \sum_{y=0}^{M-1} L_y = \sum_{y=0}^{M-1} N = MN$.

Аналогично по вертикальным профилям $S_v = \sum_{x=0}^{N-1} L_x = MN$. Площадь рассчитанная методом рассечения для однотонного изображения $S_{pr} = (S_g + S_v)/2 = MN$. Приведенная площадь $S_{pr0} = S_{pr}/MN = 1$.

Видим, что независимо от используемого метода приведенная площадь для однотонного изображения становится равной единице. Это обстоятельство может служить критерием завершения процесса плавки дуговым нагревом.

Проведем оценку чувствительности методов для остальных случаев, заявленных ранее. Под чувствительностью будем понимать отношение приращения выхода к вызвавшему его приращению входа.

Шашечки (метод триангуляции).

Длины векторов $AB = \sqrt{1 + (z_1 - z_2)^2} = \Delta$ $BC = \sqrt{2 + (z_2 - z_3)^2} = \sqrt{2}$,
 $AC = \sqrt{1 + (z_1 - z_3)^2} = \Delta$. Полупериметр: $p = \frac{AB + AC + BC}{2} = \Delta + \frac{\sqrt{2}}{2}$, площадь треугольника.

$$S_1 = \sqrt{(p - AB)(p - AC)(p - BC)p} = \sqrt{\left(\Delta + \frac{\sqrt{2}}{2} - \Delta\right)\left(\Delta + \frac{\sqrt{2}}{2} - \sqrt{2}\right)\left(\Delta + \frac{\sqrt{2}}{2} - \Delta\right)\left(\Delta + \frac{\sqrt{2}}{2}\right)} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2 \left(\Delta - \frac{\sqrt{2}}{2}\right)\left(\Delta + \frac{\sqrt{2}}{2}\right)} = \sqrt{\frac{1}{2}\Delta^2 - \frac{1}{4}} = \sqrt{\frac{1}{4}(2\Delta^2 - 1)} = \frac{1}{2}\sqrt{2\Delta^2 - 1}$$

Аналогично, $S_2 = \frac{\sqrt{2\Delta^2 - 1}}{2}$.

Площадь поверхности:

$$S_t = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (S_1 + S_2) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \left(\frac{\sqrt{2\Delta^2 - 1}}{2} + \frac{\sqrt{2\Delta^2 - 1}}{2} \right) MN = (\sqrt{2\Delta^2 - 1}) MN$$

Приведенная площадь $S_{t0} = \sqrt{2\Delta^2 - 1}$.

Шашечки (метод площадок).

Расстояние между площадками $h_{xy} = 2\Delta / 4$, $h_{x+1,y} = 2\Delta / 4$, $h_{x,y+1} = 2\Delta / 4$,
 $h_{x+1,y+1} = 2\Delta / 4$.

Площадь между площадками:

$$S_{h-h} = \sum_{x=0}^{M-2} \sum_{y=0}^{N-2} |h_{xy} - h_{x+1,y}| + |h_{xy} - h_{x,y+1}| = 0.$$

Площадь площадок $S_h = MN$, приведенная площадь поверхности равна

$$S_p = (S_h + S_{h-h}) / MN = 1.$$

Шашечки (метод рассечения).

Длина одного сечения $L_y = \sum_{x=0}^{N-1} \sqrt{1 + (z(x, y) - z(x+1, y))^2} = (\sqrt{1 + \Delta^2}) N$.

Площадь по горизонтальным сечениям $S_g = \sum_{y=0}^{M-1} L_y = MN \sqrt{1 + \Delta^2}$. Проведя

аналогичные расчеты, получаем значение площади по вертикальным сечениям

$$S_g = MN \sqrt{1 + \Delta^2}.$$

Приведенная площадь $S_{pr0} = \frac{S_g + S_v}{2} \cdot \frac{1}{MN} = \sqrt{1 + \Delta^2}$.

Для изображений типа «градиент» и «угловой градиент» приведенная площадь вычисляется аналогичным способом. Результаты аналитических вычислений приведенной площади сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Зависимость приведенной площади от структуры изображения

Фрагмент матрицы изображения	Метод триангуляции	Метод рассечений	Метод площадок
Монохром $\begin{bmatrix} \Delta & \Delta & \Delta & \Delta & \dots \\ \Delta & \Delta & \Delta & \Delta & \dots \\ \Delta & \Delta & \Delta & \Delta & \dots \\ \Delta & \Delta & \Delta & \Delta & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$	1	1	1
Шашечки (иглы) $\begin{bmatrix} 0 & \Delta & 0 & \Delta & \dots \\ \Delta & 0 & \Delta & 0 & \dots \\ 0 & \Delta & 0 & \Delta & \dots \\ \Delta & 0 & \Delta & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$	$\sqrt{2\Delta^2 - 1}$	$\Delta + 1$	1
Градиент $\begin{bmatrix} \Delta & 2\Delta & 3\Delta & 4\Delta & \dots \\ \Delta & 2\Delta & 3\Delta & 4\Delta & \dots \\ \Delta & 2\Delta & 3\Delta & 4\Delta & \dots \\ \Delta & 2\Delta & 3\Delta & 4\Delta & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$	$\sqrt{\Delta^2 + 1}$	$\frac{\sqrt{\Delta^2 + 1}}{2} + 0,5$	$\Delta + 1$
Угловой градиент $\begin{bmatrix} \Delta & 2\Delta & 3\Delta & 4\Delta & \dots \\ 2\Delta & 3\Delta & 4\Delta & 5\Delta & \dots \\ 3\Delta & 4\Delta & 5\Delta & 6\Delta & \dots \\ 4\Delta & 5\Delta & 6\Delta & 7\Delta & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$	$\sqrt{2\Delta^2 + 1}$	$\sqrt{\Delta^2 + 1}$	$2\Delta + 1$

Для проверки адекватности полученных выражений проведем моделирование заявленных типов изображений и вычислим приведенную площадь с использованием вычислительных средств, в частности, программы

MATLAB. Результаты вычисления для изображения 512x512 пикселей представлены ниже (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Численные значения приведенной площади изображений различной структуры

Фрагмент матрицы изображения	Δ	Метод триангуляции		Метод рассечений		Метод площадок	
		расчет	теория	расчет	теория	расчет	теория
Монохром	1	0,9961	1,0000	0,9980	1,0000	0,9922	1,0000
	2	0,9961	1,0000	0,9980	1,0000	0,9922	1,0000
Шашечки (иглы)	1	1,7253	1,4142	1,4115	2,0000	0,9922	1,0000
	2	2,9883	2,8284	2,2317	3,0000	0,9922	1,0000
Градиент	1	1,4132	1,4142	1,2047	1,2071	2,9768	3,0000
	2	2,2273	2,2361	1,6149	1,6180	4,9610	5,0000
Угловой градиент	1	1,7185	1,7321	1,4115	1,4142	1,9766	2,0000
	2	2,9883	3,0000	2,2317	2,2361	2,9766	3,0000

Наиболее чувствительный метод применительно к изменению площади является метод площадок. Описывая поверхность в понятиях приведенной площади сделаем следующие утверждения:

– окончание плавки характеризуется однородностью поверхности металла при завершении фазового перехода его в жидкое агрегатное состояние;

– критерием окончания плавки дуговым нагревом является минимальное значение площади поверхности изображения, полученного при фиксации отраженного света дуги от поверхности переплавляемого алюминия, представленного в виде слитков, уложенных в пространстве печи.

В начале процесса плавки заявленная площадь имеет некоторое фиксированное значение, т.к. пространство между слитками на изображении темнее поверхности самих слитков. Слитки находятся в статичном состоянии вплоть до момента фазового перехода. При фазовом переходе из твердого в

жидкое состояние приведенная площадь уменьшается, затем значение площади стабилизируется.

Покажем работу предложенных методов на примере. Допустим, что слитки алюминия имеют максимальную интенсивность отражения, свет в промежутках не отражается. При плавке происходит размытие границ. Размер исходного тестового изображения 512x512 пикселей (рисунок 2.11).

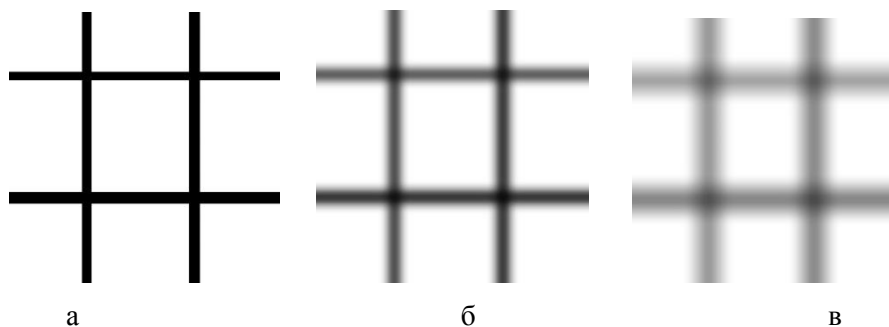


Рисунок 2.11 – Тестовые изображения *kletka* с различной степенью размытия

При рассмотрении данных изображений в 3-х мерном виде видно, что происходит размытие верхних границ, нижний уровень поднимается (рисунок 2.12).

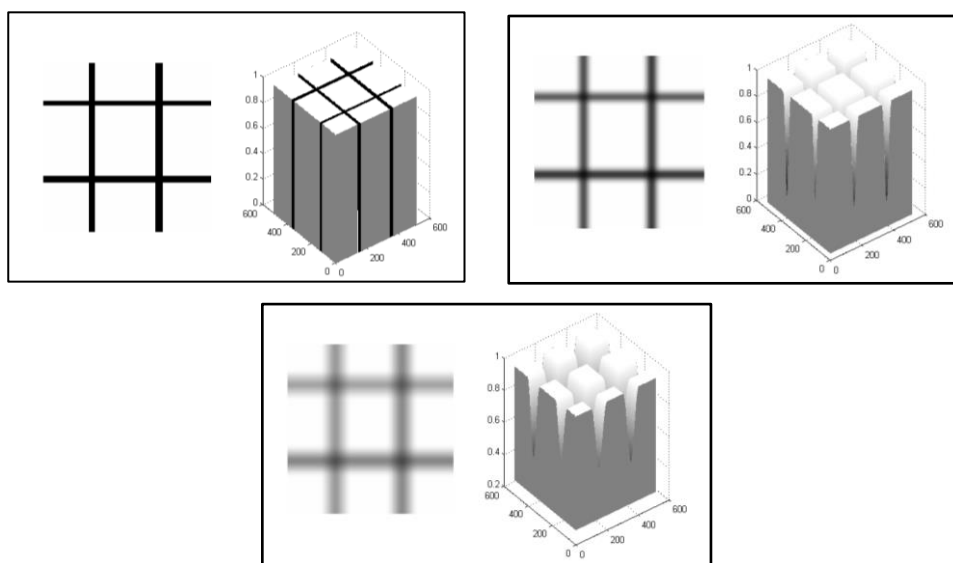


Рисунок 2.12 – Представление тестового изображения в 3-х мерном виде

Проведем оценку площади поверхности по предложенным выше способам. Полученные результаты представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Вычисленные различными методами результаты приведенной площади

№ изображения	C	S_{t0}	$S_{t0(2)}$	S_{pr0}	S_{p0}
1	0,704	4,645	4,645	2,833	5,104
2	0,498	3,329	3,330	2,201	4,065
3	0,428	2,656	2,656	1,862	3,377
4	0,385	2,299	2,299	1,681	3,004
5	0,355	2,071	2,071	1,563	2,758
6	0,332	1,909	1,909	1,480	2,581

В таблице использованы следующие обозначения:

C – яркостная контрастность;

S_{t0} и $S_{t0(2)}$ – приведенная площадь, вычисленная по методу триангуляции с прямой и обратной диагональю соответственно;

S_{pr0} – приведенная площадь вычисленная по методу расщепления поверхности;

S_{p0} – приведенная площадь вычисленная по методу «площадок».

Так как значение площадей S_{t0} и $S_{t0(2)}$ схожи в дальнейшем будут приводится расчеты только параметра S_{t0} .

При расплаве изменяется контраст областей между слитками, уходят резкие переходы интенсивности отраженного от поверхности света. И как следствие снижается приведенная площадь изображения (рисунок 2.13).

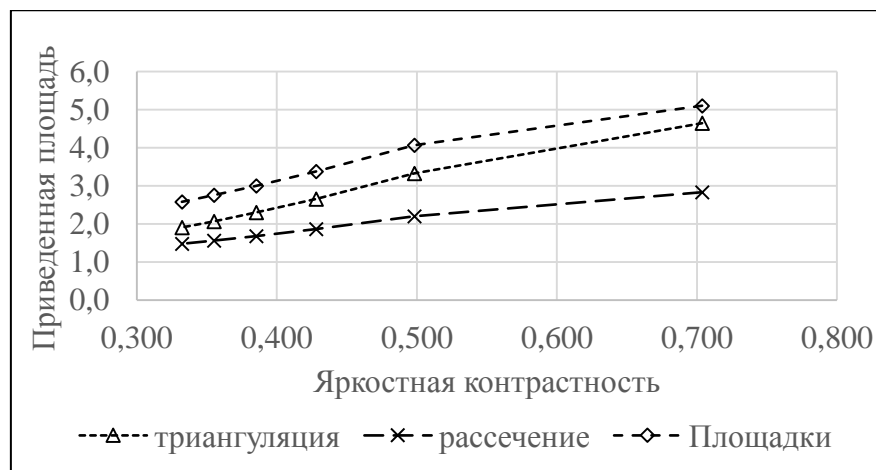


Рисунок 2.13 – Результат измерения площади для изображений *kletka-X.jpg*

Метод триангуляции и метод площадок показывают более высокую чувствительность по отношению к изменению контраста изображения ($\Delta S_0/\Delta C$), чем метод расщепления.

Допустим отраженный свет между слитками имеет расномерное распределение. Чтобы это показать используем симметричную осевую градиентную заливку (рисунок 2.14).

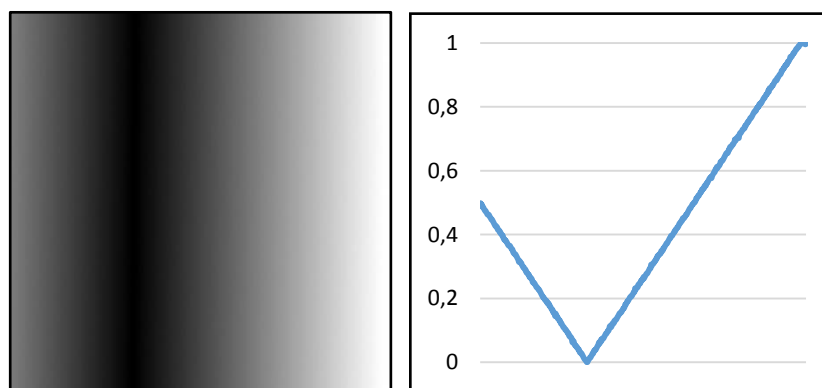


Рисунок 2.14 – Промежуток между слитками (модель) и его горизонтальный профиль. По оси ординат значение яркости точки: 0 – черная точка, 1 – белая точка, остальные значения – градации серого цвета

Проведем проверку устойчивости результатов от возможного смещения устройства видеофиксации. Для этого будем определять площадь фрагмента исходного изображения, расположенного в верхней части изображения по

центру. Далее будем смещать область определения по одной координате (в нашем случае по горизонтали) и повторно рассчитывать площадь (рисунок 2.15).

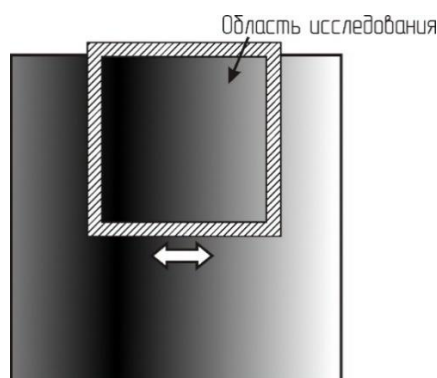


Рисунок 2.15 – Тестовое изображение с выделенной областью определения (размер изображения 512x512 пикселей, размер исследуемого фрагмента 256x256 пикселей)

Смещение проводили от центра сначала в одну сторону с шагом 10 пикселей (около 4 % от размера определяемого фрагмента), затем в другую сторону с тем же шагом. За эталонную приняли площадь фрагмента, расположенного по центру. Остальные значения отсчитываются относительно этой площади. Результат расчета представлен на рисунке 2.16.

Видно, что при равномерном переходе интенсивности от светлого к темному на изображении при смещении определяемого участка, значение определяемой площади изменяется незначительно (менее 0,2 %).

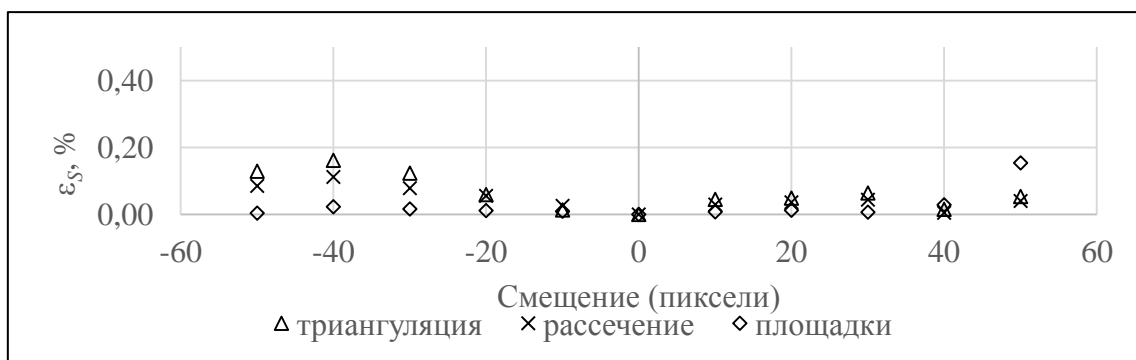


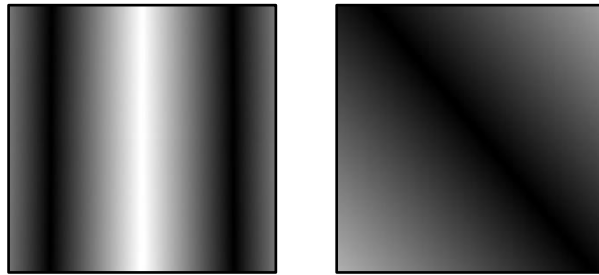
Рисунок 2.16 – Результат расчета площади различными методами при смещении области ее определения

Расчет ошибки проводили, используя выражение

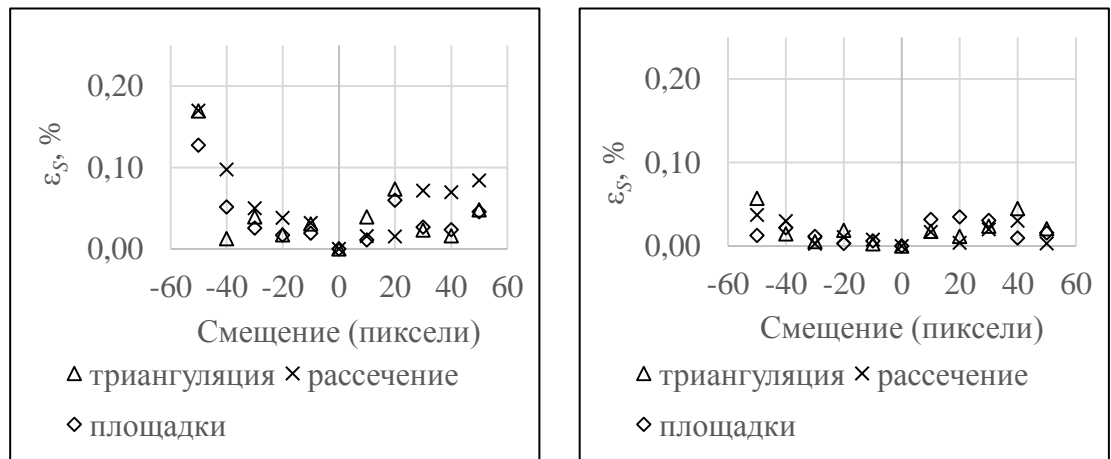
$$\varepsilon_s = \frac{S_{\text{э}} - S_{\text{смещ}}}{S_{\text{э}}},$$

где $S_{\text{э}}$ – площадь эталонного фрагмента, $S_{\text{смещ}}$ – площадь фрагмента после смещения.

Если брать изображение с несколькими переходами интенсивности и изображение с переходом, расположенным диагонально (рисунок 2.17, а), то результат измерения будет предсказуем (рисунок 2.17, б).



а



б

Рисунок 2.17 – Тестовые изображения (а) и результат расчета отклонения площади (б) при смещении области измеряемого участка относительно центральной линии

Для сложных изображений с множественными переходами изменения яркости смещение заметно влияет на результат определения площади. При смещении области определения параметров изображения на 10% линейно в сторону (в нашем случае 25 пикселей) площадь изменяется на 1% (рисунок 2.18).

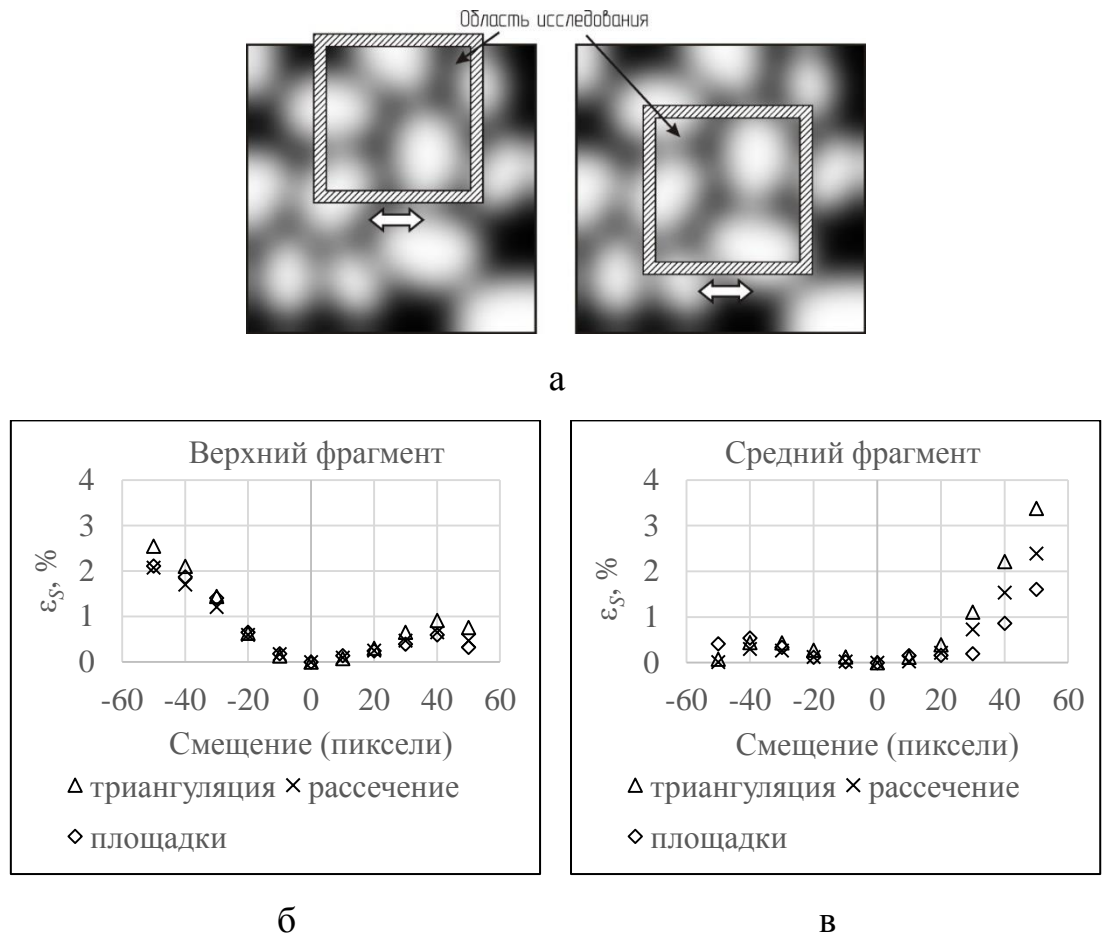


Рисунок 2.18 – Тестовое изображение *Oval-10.jpg* с выделенной областью (а) и результат расчета площади (б, в) при смещении измеряемого участка

Если брать осевое смещение центрального фрагмента, то результаты следующие (рисунок 2.19).



а



б

Рисунок 2.19 – Приведенная площадь при осевом смещении изображения (а – градиентное изображение (рисунок 2.15), б – тестовое изображение *Oval-10.jpg*)

Исследование влияния поворота на различных изображениях показало, что приемлемым является поворот не более 5 градусов, при этом значение площади центрального фрагмента меняется в пределах 1% от эталонного значения (рассчитанного до смещения).

Наблюдаемое изображение часто бывает искажено шумами и помехами различного физического происхождения: шумами видеодатчика, ошибками в каналах передачи информации и др. При математическом описании искаженных изображений используют аддитивный, импульсный и мультипликативный типы шумов [59, 60].

Обозначим незашумленное изображение $f_I(i, j)$, а изображение, искаженное аддитивным шумом $f(i, j)$. В этом случае можно записать выражение связи:

$$f(i, j) = f_I(i, j) + \xi(i, j)$$

где $\xi(i, j)$ – случайная функция, предположим, что закон распределения этой функции является гауссовским с нулевым средним и дисперсией σ_ξ^2 .

Импульсный шум проявляется на изображении в виде отдельных точек с максимальной (белой) или минимальной (черной) яркостью. Наличие белых точек называют солевой шум, наличие черных – перечный шум.

$$f(i, j) = \begin{cases} f_I(i, j), & \text{если точка } (i, j) \text{ не искажена} \\ 1, & \text{если точка } (i, j) \text{ искажена солевым шумом} \\ 0, & \text{если точка } (i, j) \text{ искажена перечным шумом} \end{cases}$$

Изображение $f(i, j)$, поврежденное мультипликативным шумом, можно представить в виде

$$f(i, j) = f_I(i, j) + \mu(i, j)f_I(i, j),$$

где $\mu(i, j)$ – случайная функция, закон распределения которой в дальнейшем примем равномерным с нулевым средним и дисперсией σ_μ^2 .

Исследуем поведение площади изображения в зависимости от зашумленности изображения. Для наложения шума на изображение в данной работе использовалась функция `imnoise(Im, 'gaussian', m, v)` пакета *Image Processing Toolbox* программы *MATLAB*. Аргументами функции являются:

Im – исходное изображение, представленное в монохромном цвете;

'gaussian' – параметр указывающий, что будет моделироваться аддитивный гауссовский шум (для импульсного и мультипликативного шума данный параметр соответственно будет выглядеть как 'salt&pepper' и 'speckle');

m – среднее значение шума (далее в работе $m=0$);

v – дисперсия шума.

Результат работы функции приведен ниже. В таблице представлено тестовое изображения с наложенным шумом (таблица 2.5), а на рисунке 2.20 профиль центральной горизонтальной линии изображения (дисперсия шума 0,01).

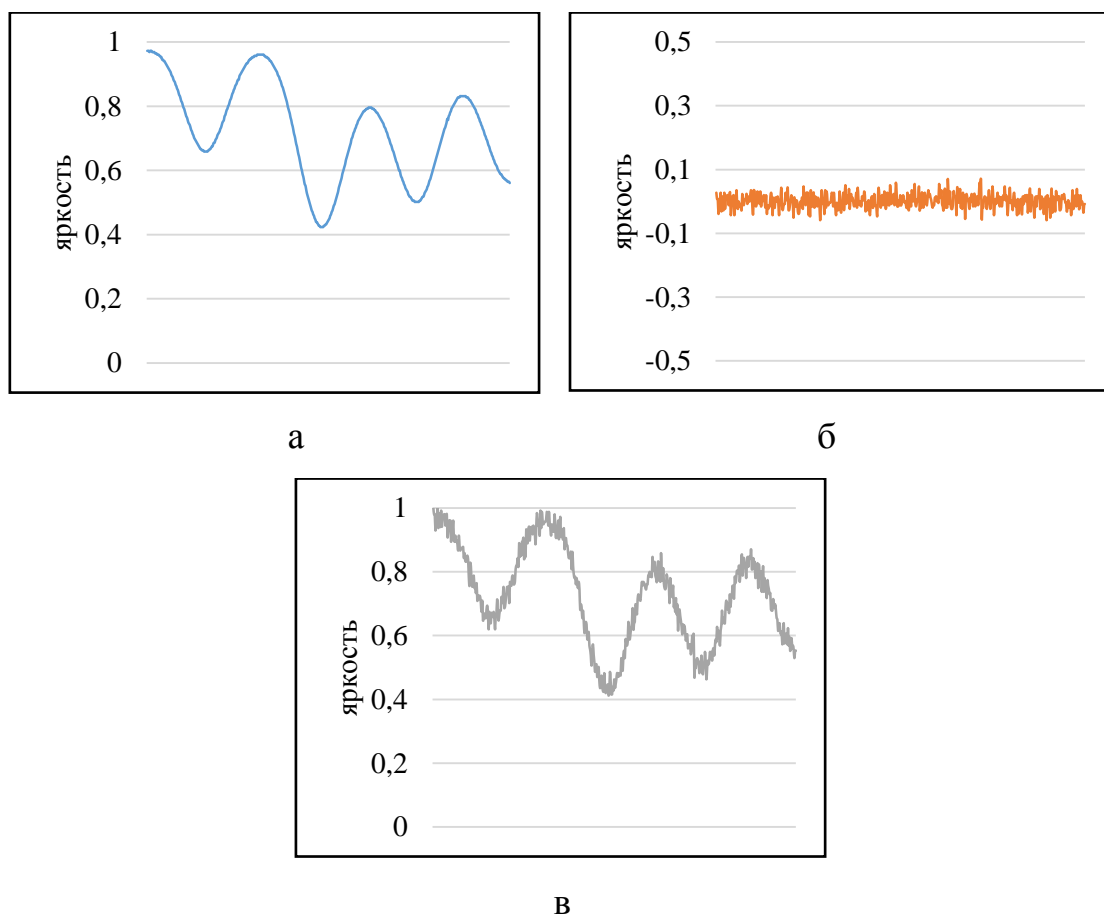
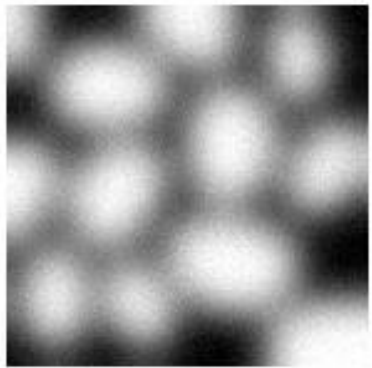

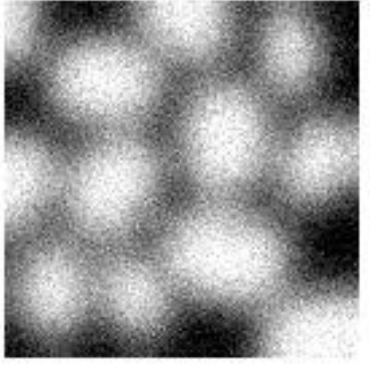
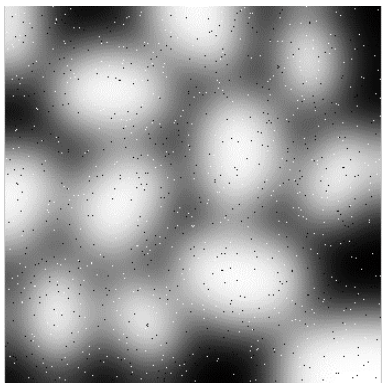
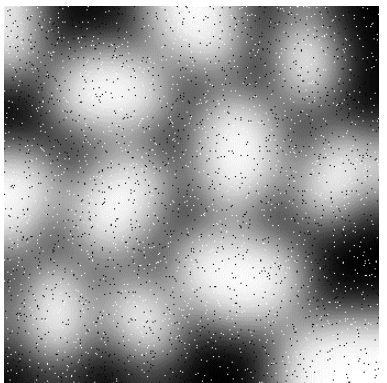
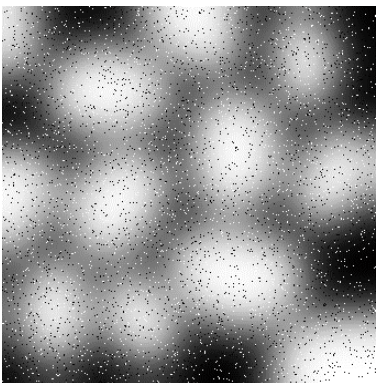
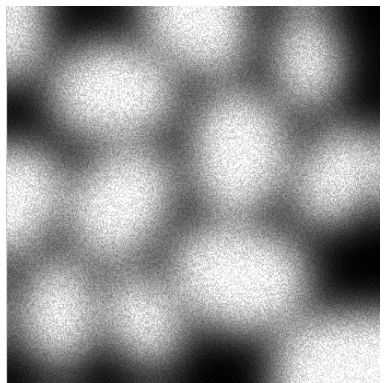
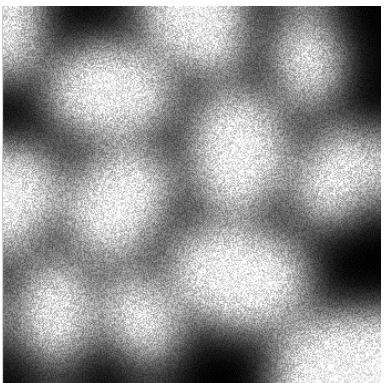
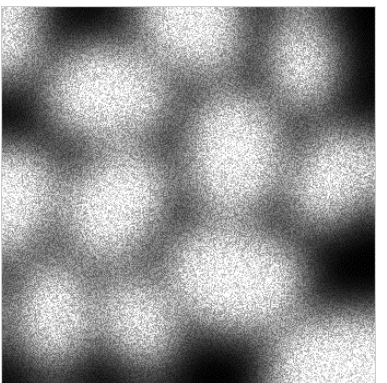


Рисунок 2.20 – Горизонтальный профиль исследуемого изображения:
а – исходное изображение, б – шум, в – аддитивная смесь исходного
изображения и шума

Таблица 2.5 – Искаженные изображения при наложении различного шума

Аддитивный шум		
 $\sigma_{\xi}^2 = 0,0005$	 $\sigma_{\xi}^2 = 0,001$	 $\sigma_{\xi}^2 = 0,005$
Импульсный шум		
 доля искаженных пикселей 0,01	 доля искаженных пикселей 0,03	 доля искаженных пикселей 0,05
Мультипликативный шум		
 $\sigma_{\xi}^2 = 0,01$	 $\sigma_{\xi}^2 = 0,02$	 $\sigma_{\xi}^2 = 0,03$

Результаты расчета площади методом триангуляции в случае наложения аддитивного шума представлены в таблице 2.6. Тестовые изображения представлены на рисунке 2.21.

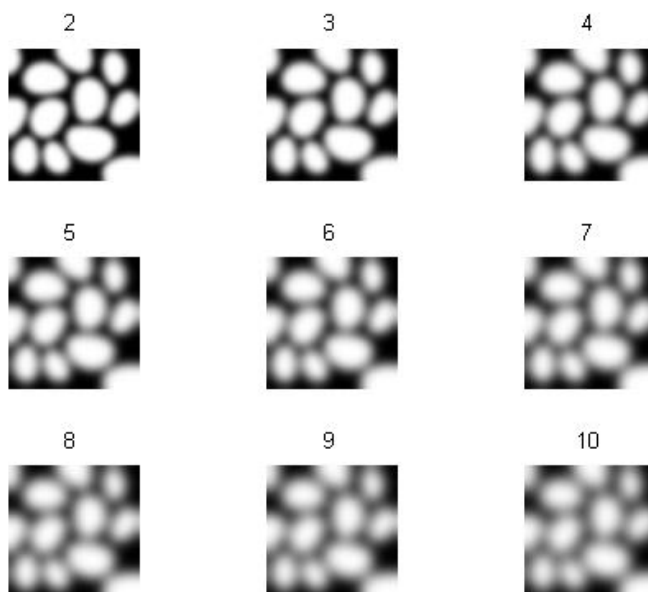


Рисунок 2.21 – Тестовый пакет изображений *oval-x.jpg*

Таблица 2.6 – Приведенная площадь поверхности при различной зашумленности изображений (метод триангуляции)

Изображение	C	σ_{ξ}^2				
		0	0,0005	0,001	0,005	0,01
1	0,82	4,23	9,01	11,76	23,67	32,46
2	0,74	3,71	9,34	12,46	25,67	35,27
3	0,69	3,36	9,55	12,89	26,91	37,10
4	0,65	3,09	9,69	13,19	27,81	38,19
5	0,62	2,87	9,81	13,44	28,48	39,28
6	0,59	2,69	9,92	13,63	28,89	40,05
7	0,56	2,54	9,93	13,69	29,43	40,57
8	0,53	2,41	10,01	13,79	29,71	41,12
9	0,51	2,29	10,01	13,92	29,97	41,69
10	0,49	2,19	10,06	13,99	30,17	42,06

Из таблицы видно, что наложенный шум значительно увеличивает значение приведенной площади, меняется скорость и направление изменения

этой площади в зависимости от выбранного изображения в тестовом пакете изображений (рисунок 2.22).

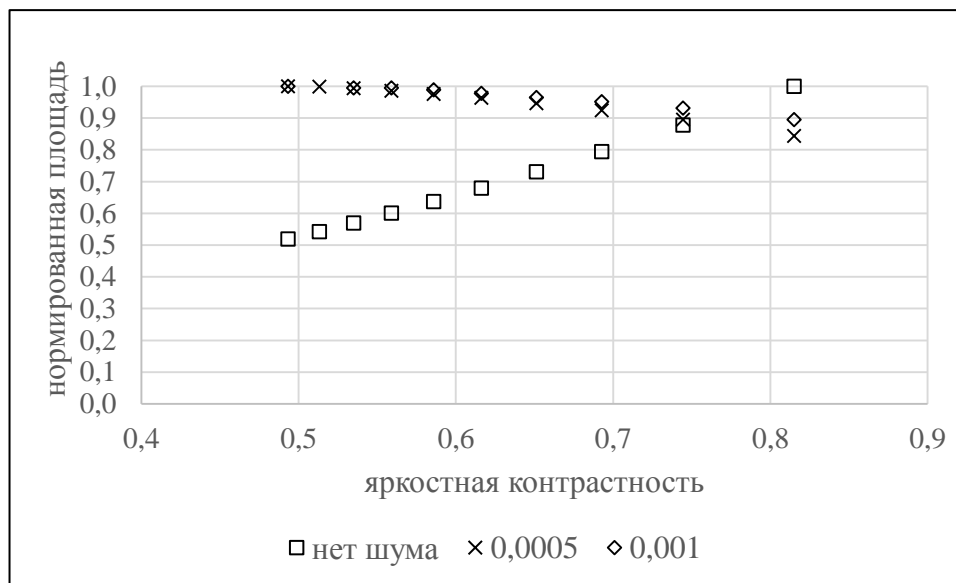


Рисунок 2.22 – Вычисленная площадь тестовых изображений при различном значении дисперсии шума. Значения площади нормализованы

Для снижения влияния шума на изображении применим усредняющий низкочастотный фильтр [61], который можно представить в виде свертки обрабатываемого изображения с фильтром. Ядро фильтра можно представить в виде матрицы или маски, коэффициенты которой имеют разное значение (вес):

$$f_0(x, y) = \sum_{(s,t) \in S_{xy}} h(s, t) f(s, t),$$

где $f(s, t)$, $f_0(x, y)$ – яркости пикселей с координатами (s, t) и (x, y) соответственно искаженного и восстановленного изображений, $h(s, t)$ – весовые коэффициенты матрицы ядра фильтра, S_{xy} – область задания ядра фильтра или его апертура (центр апертуры S_{xy} совпадает с пикселем $f(x, y)$ искаженного изображения).

Яркости пикселя с координатами (x, y) обработанного изображения представляет собой значение $f_0(x, y) = \frac{1}{mn} \sum_{(s,t) \in S_{xy}} f(s, t)$. Здесь S_{xy} – прямоугольная окрестность (некоторая область изображения) размером $m \times n$ с центром в пикселе (x, y) [55, 62-64].

Проведены исследования по изучению эффективности снижения влияния зашумленности изображения в зависимости от величины используемой маски, используемой при фильтрации исходного изображения. Результаты вычисления для изображения, указанного выше, представлены на рисунке 2.23. Также были проведены расчеты и для других тестовых изображений. Выявлено, что при использовании маски 7×7 можно добиться удовлетворительных результатов.

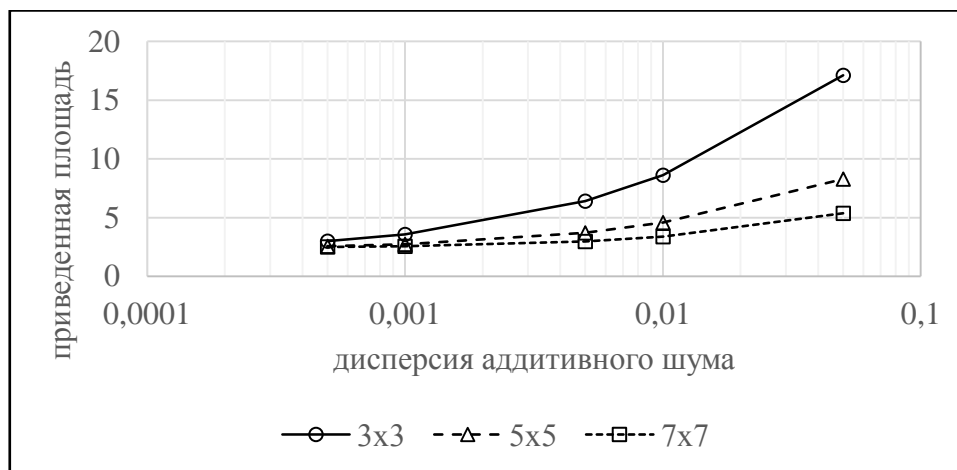


Рисунок 2.23 – Площадь зашумленного изображения после постобработки (усреднения) при различном размере маски фильтра

Влияние шума на результат вычисления площади поверхности снижено, но исключить влияние с помощью усреднения в достаточной степени не удастся (таблица 2.7).

Таблица 2.7 – Приведенная площадь изображения, вычисленная методом триангуляции, до и после фильтрации

		σ_{ξ}^2			
		0,0005	0,001	0,005	0,01
Вид изображения	зашумленное	9,83	13,80	30,20	42,01
	шум	10,01	13,93	30,26	42,04
	отфильтрованное	2,56	2,72	3,69	4,57

Повторим вычисления расчета приведенной площади для ряда изображений рассмотренных ранее с учетом возможности снижения шума (рисунок 2.24).

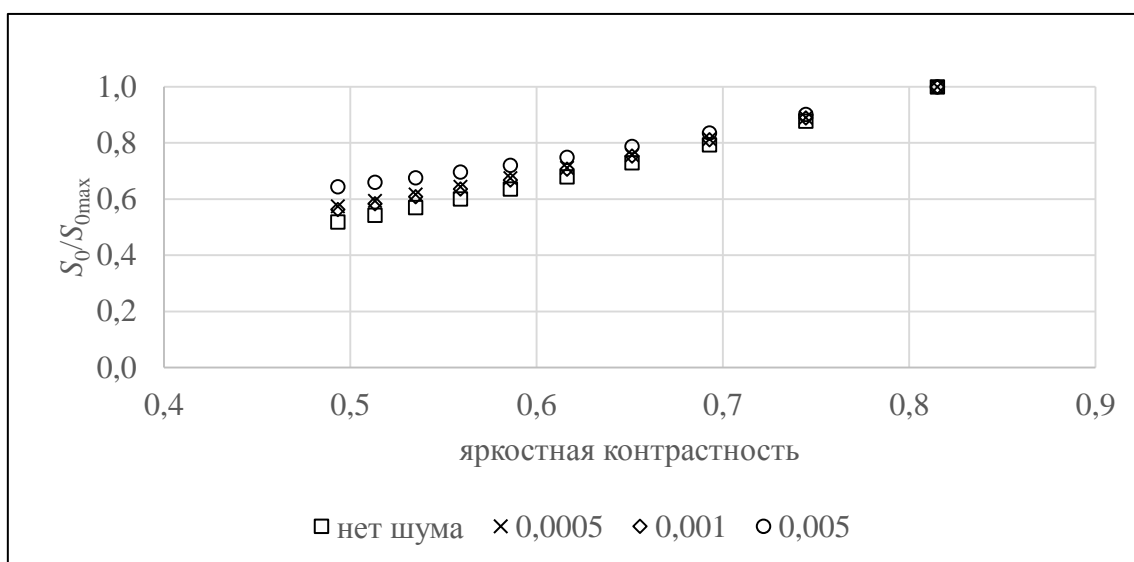


Рисунок 2.24 – Вычисленная методом триангуляции площадь тестовых изображений при наложенном аддитивном шуме и дальнейшей фильтрации.

Значения площади нормализованы (S_0 – приведенная площадь, S_{0max} – максимальное значение приведенной площади).

Тенденция уменьшения площади сохраняется. Это говорит о том, что метод оценки площади поверхности применим для оценки различных поверхностей в процессе их изменения после их предварительной фильтрации.

Влияние импульсного и мультипликативного шума было исследовано аналогичным образом. На рисунках 2.25 и 2.26 приведены результаты.

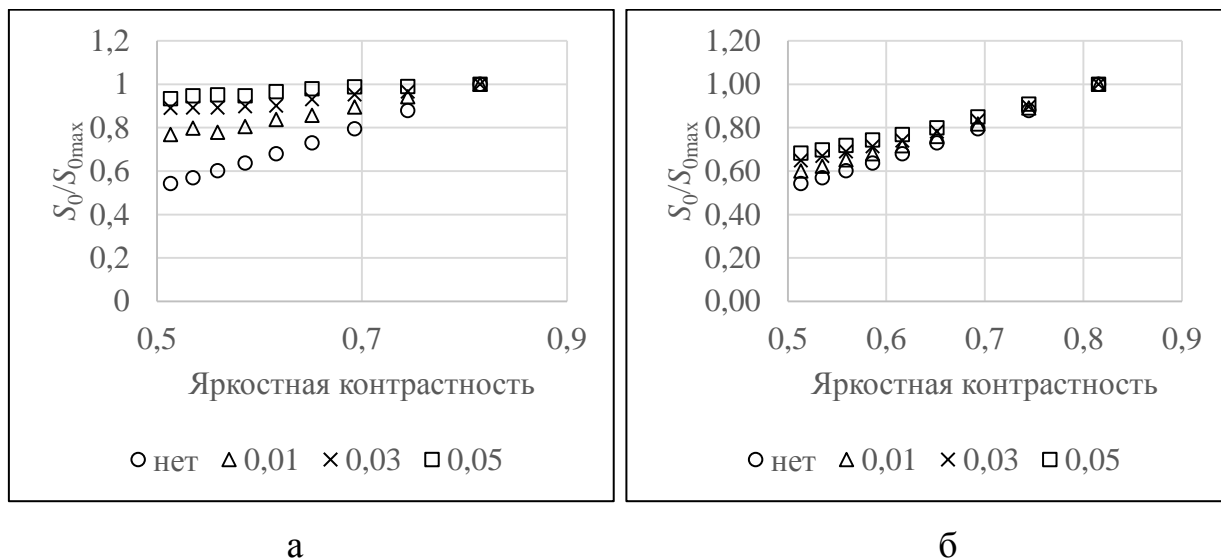


Рисунок 2.25 – Влияние наложенного импульсного шума на динамику изменения площади (в качестве параметра – доля искаженных пикселей):

а – до фильтрации изображения, б – после фильтрации

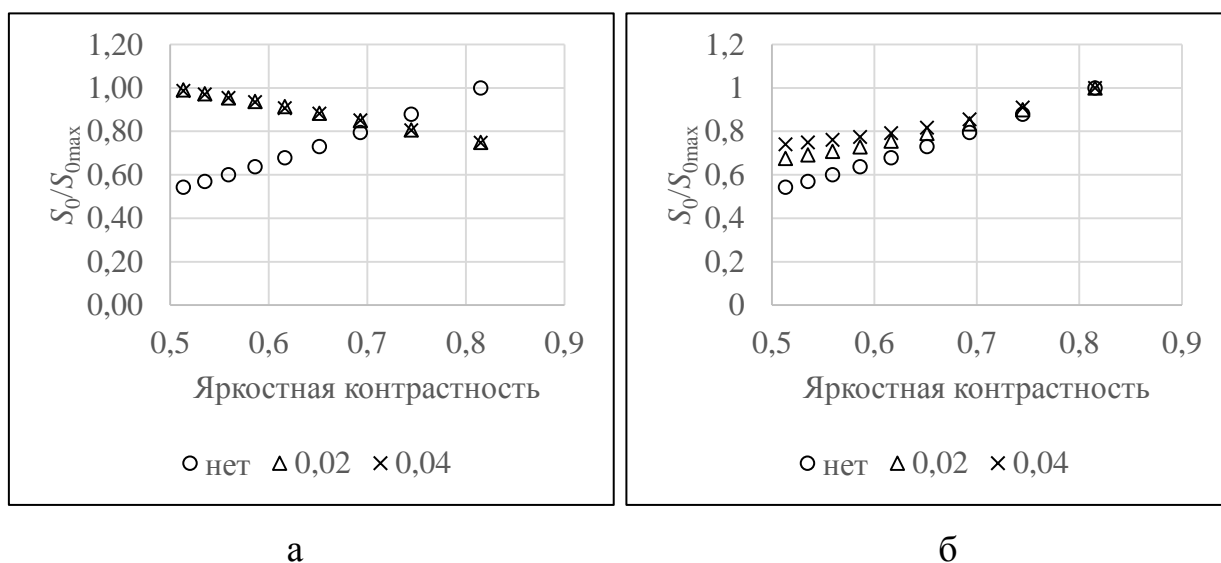


Рисунок 2.26 – Влияние наложенного мультипликативного шума на динамику изменения площади (в качестве параметра – дисперсия шума):

а – до фильтрации изображения, б – после фильтрации

Предобработка изображений, искаженных шумовой составляющей, обеспечивает необходимое условие для дальнейшего расчета приведенной

площади. Изображение поверхности должно быть представлено в монохромном спектре.

Изменение формы слитков происходит в момент расплавления и заканчивается когда металл переходит в жидкое состояние. Изменение площади в процессе будет следующим:

- нагрев металла до температуры плавления – постоянная площадь;
- плавление металла – площадь уменьшается;
- металл расплавился – площадь постоянна.

Постоянной будем считать площадь, которая в течение некоторого промежутка времени будет изменяться не более чем на 1 % .

На рисунке 2.27 представлено схематическое изменение площади поверхности в процессе плавки с учетом возможных искажений.

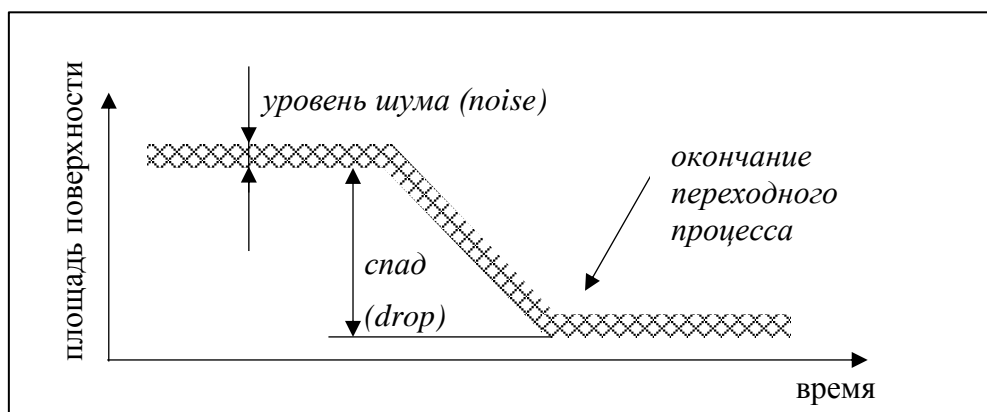


Рисунок 2.27 – Предполагаемое поведение площади металла при переплаве

Используется следующий алгоритм определения окончания плавки на основании анализа изменения площади поверхности металла:

- определение степени изменения площади:

$$S_{izm}(t) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{k=t}^{t+n} S_0(k) - \frac{1}{n} \sum_{m=t+1}^{t+n+1} S_0(m)}{\frac{1}{n} \sum_{k=t}^{t+n} S_0(k)},$$

здесь n – количество усредняемых значений площади ($n = 3 \div 5$);

S_0 – значение приведенной площади.

– определение момента начала расплавления ($trigger = 1$) по резкому уменьшению площади при заданном уровне шума (параметр $noise$). Оценка шумовой составляющей определяется в начальный период плавки.

$$trigger = \begin{cases} 1, \text{ если } S_{izm} > noise \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases};$$

– фиксация значения площади в начале спада

$$Str_f = \begin{cases} S_{izm}(t), \text{ если } trigger = 1 \text{ и } Str_f = 0 \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases}$$

Далее происходит выявление окончания спада. Спад должен быть не менее 30% от начального уровня (уровень спада определен при проведении экспериментальных плавов на лабораторной печи).

$$result_Str = \begin{cases} 1, \text{ если } \frac{Str_f - Str(t)}{Str_f} \geq 0,3 \text{ и } S_{izm}(t) \leq noise \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases}.$$

При $result_Str = 1$ процедура алгоритма управления переходом твердое-жидкое считается законченной.

Проведем расчет времени выполнения операции на сглаживание и расчет площади. Измерения проводились 1000 раз для каждой операции, а затем полученные значения усреднялись (рисунки 2.28 и 2.29). Тестовое изображение размером 512x512 пикселей. Измерения проводились с применением пакета *MATLAB R2009a*, установленным на ОС *Windows XP SP2*.

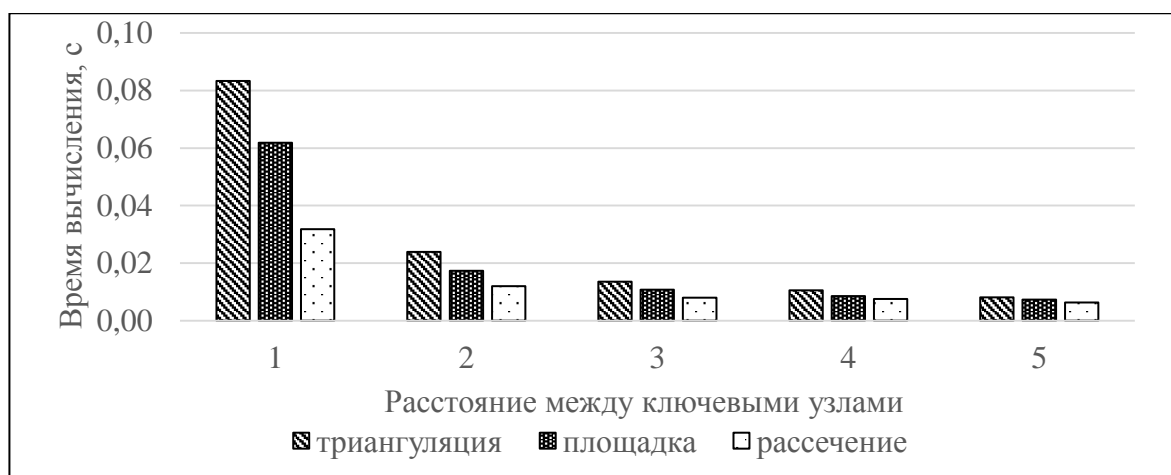


Рисунок 2.28 – Временные затраты на вычисление площади различными методами

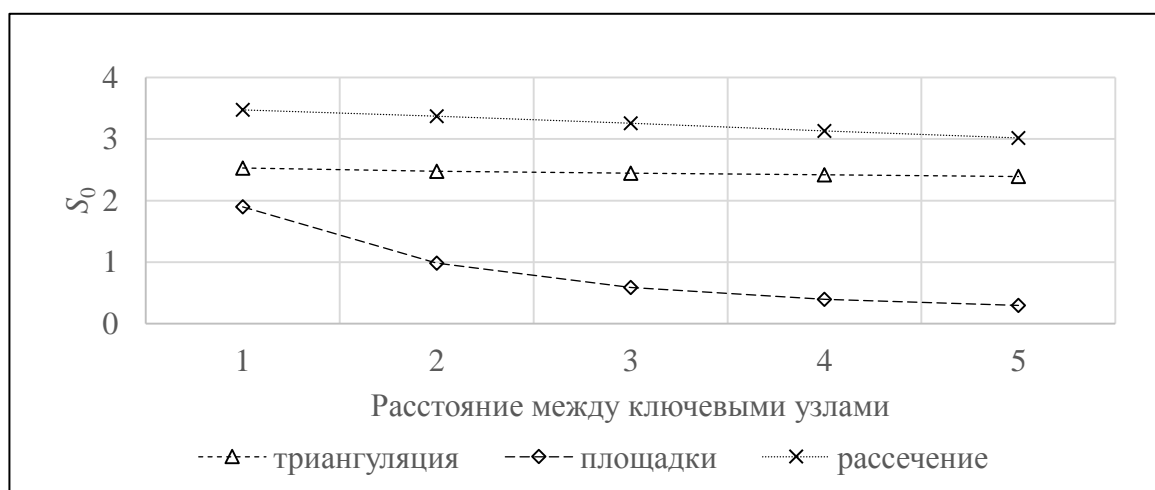


Рисунок 2.29 – Значение площади при заданных параметрах функции вычисления

Выявлено, что наиболее быстродействующим методом вычисления площади является метод рассечений. В случае, если производить расчет площади по каждой второй точке, все методы показывают сравнительно одинаковую производительность. При этом метод рассечений показывает значительно меньшее значение вычисленной площади [65, 66].

2.3 Оценка фрактальной размерности поверхности при расплавлении

Отличительной особенностью фрактальной размерности является то, что она характеризует степень заполнения пространства, в которой существует фрактальная система [67, 68, 69]. Большему значению фрактальной размерности соответствует большая степень заполнения изображения (его трехмерного представления). Для совершенно черного изображения фрактальная размерность будет равна $D = 2$, т.е. совпадать с топологической размерностью плоскости, а для изображения имеющего одинаковую яркость всех пикселей – $D = 3$ (топологическая размерность объема). Изображения в градациях серого имеют дробную фрактальную размерность $D \in [2, 3]$. Для черно-белых изображений фрактальная размерность лежит в пределах $D \in [1, 2]$.

Существует ряд методов и подходов к определению (и трактованию) фрактальных размерностей, среди которых, благодаря относительной простоте определения и распространенности, выделяется размерность Минковского, также известная как *Minsowski-Bouligand dimension* или *box-counting dimension*. Технически её вычисление сводится к следующей процедуре:

- изображение покрывается сеткой с заданным размером ячейки ε ;
- подсчитывается количество ячеек сетки, в которые попадает фрактал изображения $N(\varepsilon)$;
- размер ячейки уменьшается, считается новое значение $N(\varepsilon)$;
- процедура уменьшения размера ячейки ε и расчета $N(\varepsilon)$ повторяется до достижения требуемого размера ε .

Выражение для расчета фрактальной размерности:

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} (\log N(\varepsilon) / \log(\varepsilon)) .$$

График зависимости $\log N(\varepsilon)$ от $\log(\varepsilon)$ – прямая с угловым коэффициентом m . Рассмотрим задачу интерполяции точек $(\log(\varepsilon_i), \log N(\varepsilon_i))$ прямой.

В качестве примера рассмотрим нахождение фрактальной размерности для квадратного изображения со сторонами равными M и N .

Примем длину ячейки сетки, покрывающую наше изображение, равную L , тогда

$$\forall L \in [1, L_{\max}], L_{\max} \in \mathbb{N}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} N(L) = 0 \\ \forall i \in \left[1, \text{floor}\left(\frac{M}{L}\right) \right] \\ \forall j \in \left[1, \text{floor}\left(\frac{N}{L}\right) \right] \\ count = \sum_{k=(i-1)L+1}^{iL} \left(\sum_{l=(j-1)L+1}^{jL} S(k,l) \right) \\ N(L) = \begin{cases} N(L) = N(L) + 1, count > 0 \\ N(L), count = 0 \end{cases} \end{array} \right.$$

здесь $\text{floor}(x)$ – функция округления в меньшую сторону до ближайшего целого числа;

$count$ – число ненулевых пикселей в заданной клетке;

$S(k, l)$ – значение функции в клетке с заданными координатами;

$N(L)$ – количество клеток, содержащих хотя бы один ненулевой пиксель, при размере клетки L .

Обозначим $\varepsilon_L = \log(L)$, $\eta_L = \log(N(L))$. искомая функция описывается уравнением $f(\varepsilon) = m\varepsilon_i + b$, используя метод наименьших квадратов найдем коэффициенты m и b , при которых функция стремится к минимальному значению:

$$E = \sum_{i=1}^n (\eta_i - f(\varepsilon))^2 = \sum_{i=1}^n (\eta_i - (b + m\varepsilon_i))^2 \rightarrow \min.$$

Проведя расчет производных первого порядка получим выражения для расчета коэффициентов m и b . Параметр m является значением *фрактальной размерности*.

Найдем частные производные первого порядка

$$\frac{\partial E}{\partial m} = 0; \quad \frac{\partial E}{\partial b} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial m} &= \left(\sum_{i=1}^n (\eta_i - (b + m\varepsilon_i))^2 \right)'_m = \sum_{i=1}^n [2(\eta_i - (b + m\varepsilon_i)) \cdot (\eta_i - (b + m\varepsilon_i))'_m] = \\ &= 2 \sum_{i=1}^n [(\eta_i - b - m\varepsilon_i) \cdot (-\varepsilon_i)] = 2 \sum_{i=1}^n (m\varepsilon_i^2 + b\varepsilon_i - \varepsilon_i\eta_i) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial b} &= \left(\sum_{i=1}^n (\eta_i - (b + m\varepsilon_i))^2 \right)'_b = \sum_{i=1}^n [2(\eta_i - (b + m\varepsilon_i)) \cdot (\eta_i - (b + m\varepsilon_i))'_b] = \\ &= 2 \sum_{i=1}^n [(\eta_i - b - m\varepsilon_i) \cdot (-1)] = 2 \sum_{i=1}^n (m\varepsilon_i + b - \eta_i) \end{aligned}$$

Получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} 2 \sum_{i=1}^n (m\varepsilon_i^2 + b\varepsilon_i - \varepsilon_i\eta_i) = 0 \\ 2 \sum_{i=1}^n (m\varepsilon_i + b - \eta_i) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sum_{i=1}^n m\varepsilon_i^2 + \sum_{i=1}^n b\varepsilon_i - \sum_{i=1}^n \varepsilon_i\eta_i = 0 \\ \sum_{i=1}^n m\varepsilon_i + \sum_{i=1}^n b - \sum_{i=1}^n \eta_i = 0 \end{cases} \Rightarrow$$

$$\begin{cases} m \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 + b \sum_{i=1}^n \varepsilon_i = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i\eta_i \\ m \sum_{i=1}^n \varepsilon_i + bn = \sum_{i=1}^n \eta_i \end{cases}$$

В матричной записи

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 & \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \\ \sum_{i=1}^n \varepsilon_i & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \eta_i \\ \sum_{i=1}^n \eta_i \end{pmatrix}$$

Решая систему уравнений, получаем:

$$m = \frac{n \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \eta_i - \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \sum_{i=1}^n \eta_i}{n \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \varepsilon_i \right)^2},$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \sum_{i=1}^n \eta_i - \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \eta_i}{n \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \varepsilon_i \right)^2},$$

где n – количество пар значений (ячейка – количество ячеек).

Как будет показано ниже, значение фрактальной размерности снижается при снижении контраста изображения. Следовательно, существует промежуток времени (момент расплава), где заявленная размерность снижается от одного устойчивого уровня до другого устойчивого уровня.

Для сглаживания возможных колебаний значений фрактальной размерности применим метод скользящего среднего с величиной окна равного n .

$$D_{izm}(t) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{k=t}^{t+n} D(k) - \frac{1}{n} \sum_{m=t+1}^{t+n+1} D(m)}{\frac{1}{n} \sum_{k=t}^{t+n} D(k)}.$$

Момент снижения размерности фиксируется в переменной *triggerD*.

$$triggerD = \begin{cases} 1, & \text{если } D > noise \\ 0, & \text{если } D < noise \end{cases}$$

Значение, от которого будет вестись отсчет степени изменения размерности:

$$D_{-f} = \begin{cases} D_{-izm(t)}, & \text{если } triggerD = 1 \text{ и } D_{-f} = 0 \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

Результат окончания изменения фрактальной размерности

$$result_D = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{D_{-f} - D(t)}{D_{-f}} \geq 0,02 \text{ и } D_{-izm(t)} \leq noise \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

Перед вычислением фрактальной размерности проведем пороговую обработку изображения (препарирование) [70]. В качестве примера рассмотрим изображение *kletka.jpg*.

При малых порогах бинаризации происходило пропадание элементов изображения (черные области). Что при вычислении фрактальной размерности по представленному алгоритму приводило к ошибке. Ниже представлено разложение изображения по различным уровням бинаризации (рисунок 2.30).

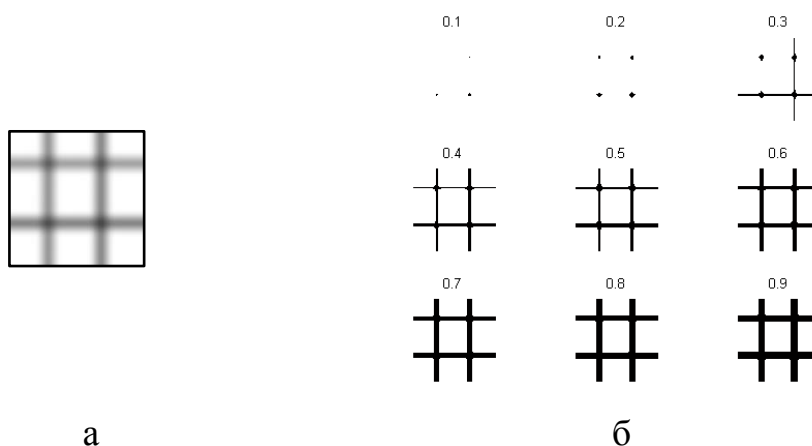


Рисунок 2.30 – Применение к тестовому изображению (а) различных порогов бинаризации (б)

При малых порогах бинаризации на бинаризованном изображении можно увидеть наиболее темные области. Чем больше порог, тем больше объектов попадает на изображение. Оценка фрактальной размерности приведена на рисунке 2.31.

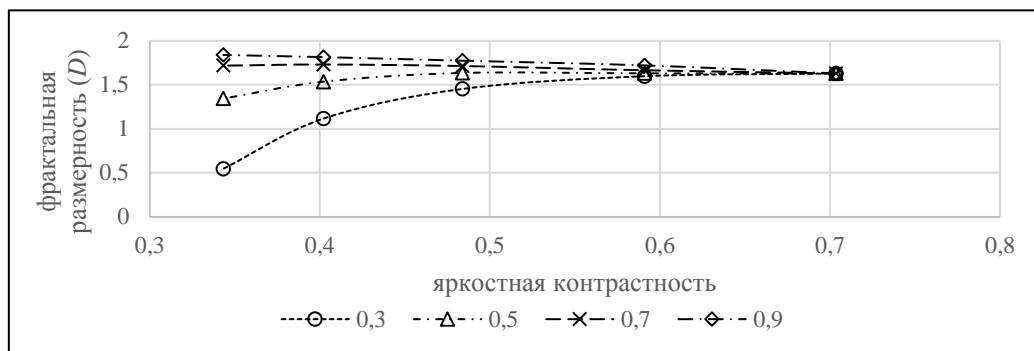


Рисунок 2.31 – Фрактальная размерность при различных порогах бинаризации

При малых порогах бинаризации фрактальная размерность уменьшается, при увеличении размытости изображения. При больших порогах обратная ситуация. Т.к. область нашего интереса темные участки между слитками, то в дальнейшем расчет фрактальной размерности будем проводить при малых порогах бинаризации.

Для исключения неопределенности в выборе порога бинаризации, зададимся следующими способами задания порога:

- 1) порог, определяемый по Оцу [71];
- 2) среднее значение интенсивности всего изображения $t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_i$;
- 3) среднее значение между максимальной и минимальной интенсивностью на изображении $t = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2}$.

На рисунке 2.32 показан расчет фрактальной размерности для различных массивов тестовых изображений.

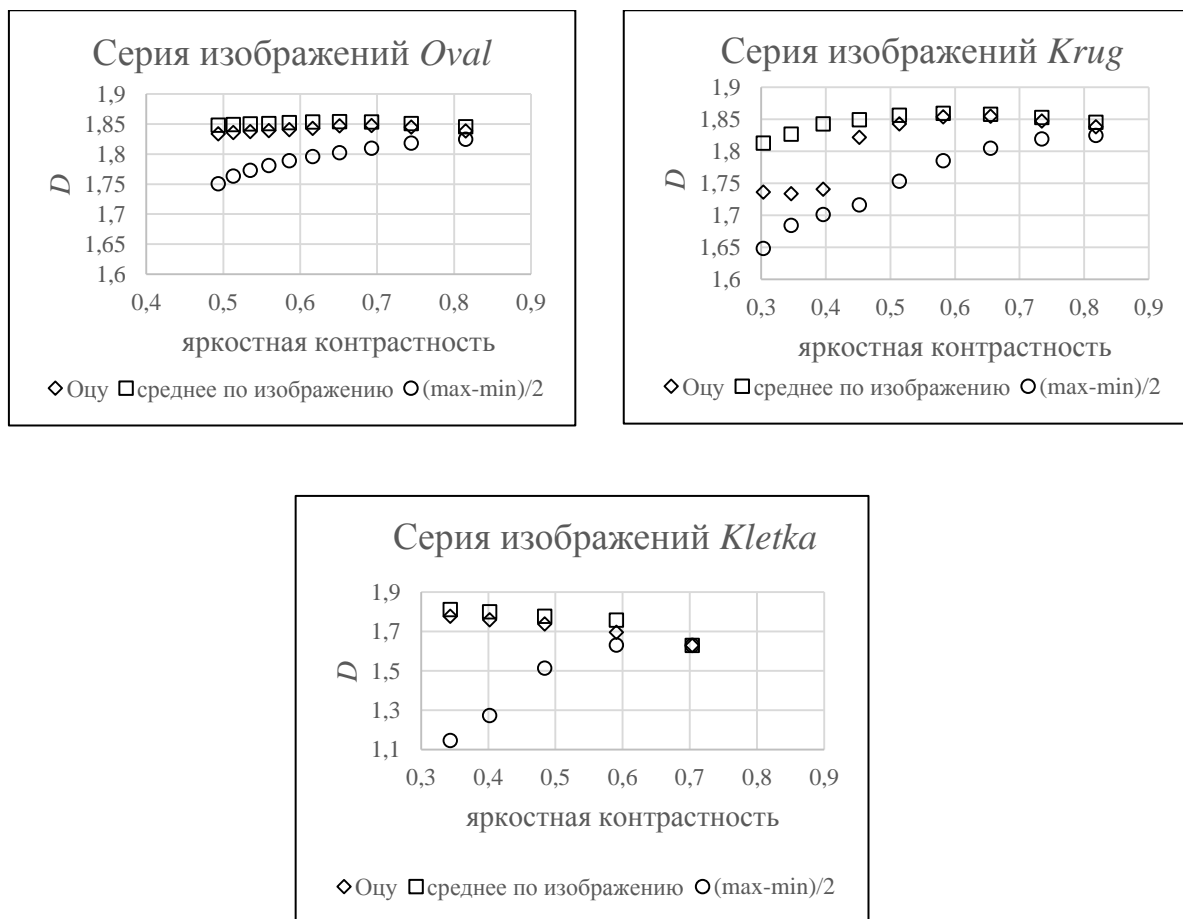
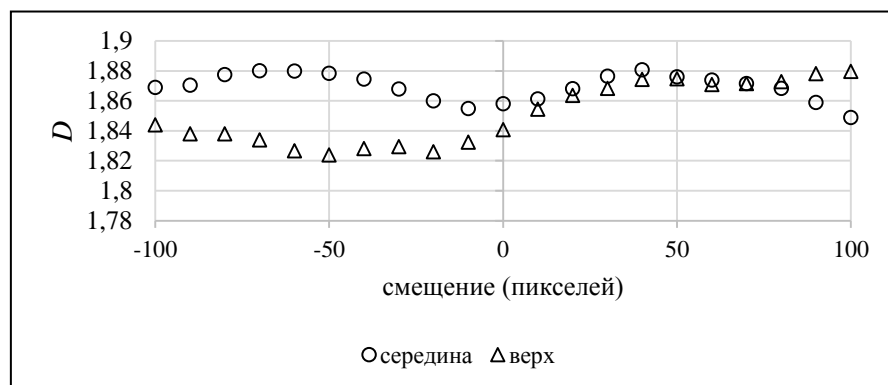


Рисунок 2.32 – Фрактальная размерность изображений при различных способах выбора порога бинаризации

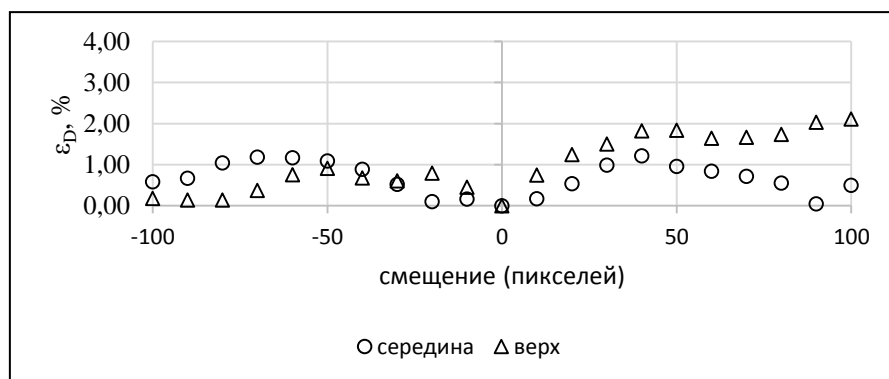
Можно заметить, что способ выбора порога бинаризации по усредненному значению суммы максимальной и минимальной интенсивности (способ 3) дает наиболее устойчивый результат при использовании в качестве исходных данных незашумленные тестовые изображения. Фрактальная размерность снижается со снижением контраста изображения поверхности металла.

Другие два способа (1 и 2) дают неоднозначную оценку для разного рода изображений. При обработке изображений *kletka-X.jpg* фрактальная размерность возрастает, для изображений *Oval-X.jpg* размерность изменяется незначительно, а для изображений *Krug-X.jpg* сначала возрастает, затем падает.

Рассмотрим поведение фрактальной размерности при смещении области определения на исходном изображении (рисунок 2.33). Тестовое изображение возьмем то же, что и в разделе 2.3 данной работы (серия *Oval-X.jpg*).



а



б

Рисунок 2.33 – Фрактальная размерность области изображения (а) и относительная ошибка ее определения (б)

Вычисление ошибки проводили по формуле $\varepsilon_D = \frac{D_{\text{э}} - D_{\text{смещ}}}{D_{\text{э}}}$, где

$D_{\text{э}}$ – значение фрактальной размерности эталонного фрагмента,
 $D_{\text{смещ}}$ – значение фрактальной размерности смещенного фрагмента.

Алгоритм вычисления фрактальной размерности для двухмерного случая приведен ниже (рисунок 2.34).

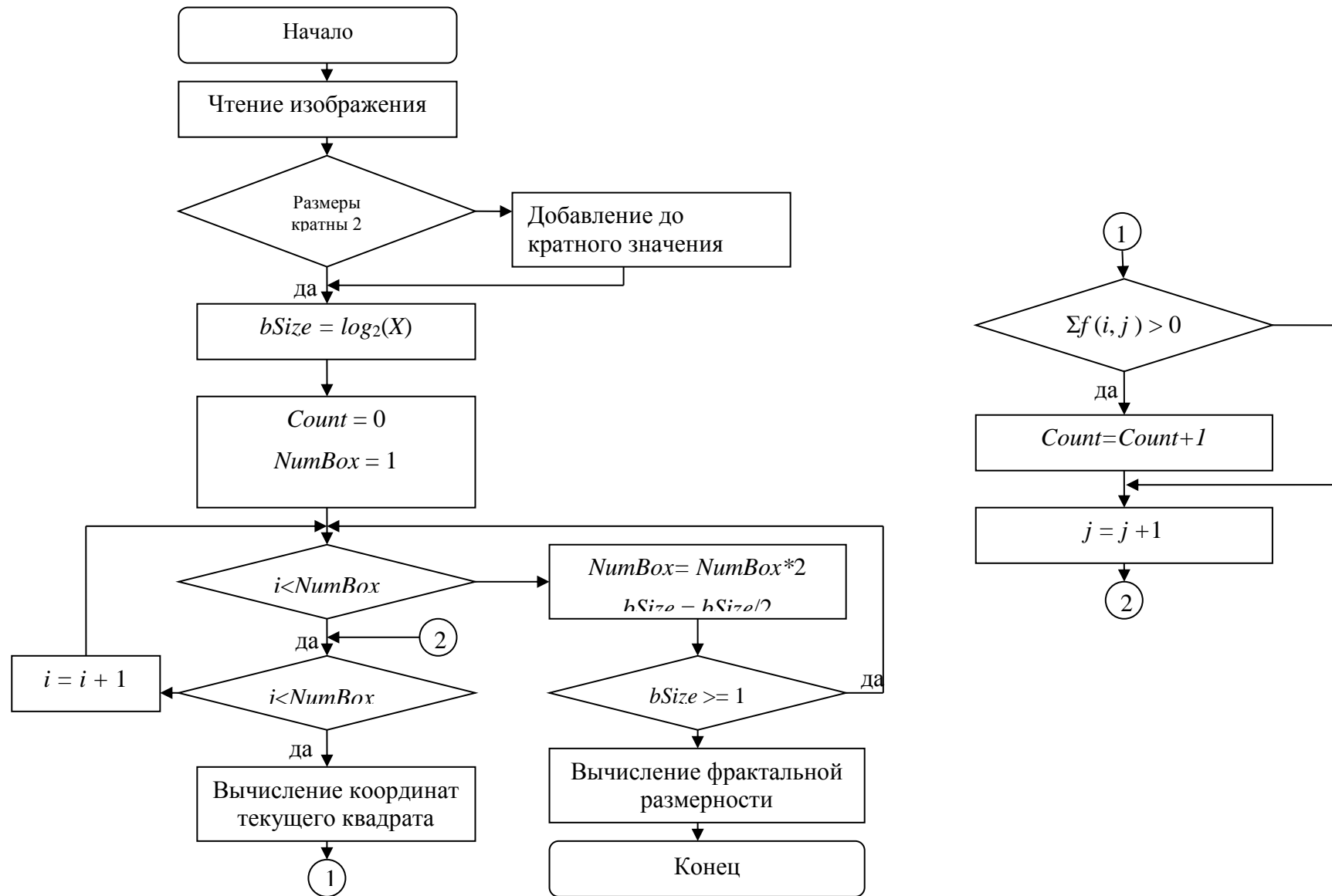


Рисунок 2.34 – Блок схема алгоритма определения фрактальной размерности

Влияние осевого смещения на фрактальную размерность показано в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Фрактальная размерность при осевом смещении исследуемого изображения

угол поворота, град	0	1	2	3	4	5
D	1,8616	1,8599	1,8580	1,8528	1,8487	1,8518
ε_D , %	0,00	0,09	0,20	0,47	0,69	0,53

Влияние аддитивного шума на поведение фрактальной размерности при изменении яркостной контрастности представлено на рисунке 2.35.



Рисунок 2.35 – Фрактальная размерность при различном уровне аддитивного шума. Значение размерности нормализованы

В связи с тем, что изменение фрактальной размерности не настолько существенные, относительно изменения площади тех же тестовых изображений (уменьшение фрактальной размерности не более чем на 5% против уменьшения площади в пределах 40%), искажения (сдвиг, поворот, наложение шума) вносят большую ошибку в итоговый результат [72]. Искажения, имеющиеся на изображениях, могут не позволить достоверно определить момент фазового перехода при использовании фрактальной размерности.

2.4 Выводы по главе 2

1. Использование метода анализа разностных изображений позволяет выявить процесс изменения поверхности слитков при плавке. Для этого на начальном этапе плавки, при обработке изображений металла, вычисляется порог бинаризации, который используется далее для обработки разностных изображений с целью определения периода смены агрегатного состояния.

2. При полном расплавлении поверхность становится слабоконтрастной и значение ее площади принимает минимальное значение. Для получения достоверной динамики изменения площади, изображение предварительно должно быть сглажено низкочастотным фильтром.

3. Показано, что при расплавлении металла уменьшается фрактальная размерность изображения его поверхности. Изображение необходимо предварительно бинаризовать с порогом, предположительно определяемым как среднее между максимальным и минимальным значением яркости исходного изображения.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ РАСПЛАВЛЯЕМОГО МАТЕРИАЛА

3.1 Выбор цветовой модели получаемого изображения

Для анализа изображений, получаемых с устройства видеофиксации, необходимо выбрать подходящую обработки цветовую модель.

RGB самая популярная модель, основанная на представлении цвета с помощью трех каналов красного (*Red*), зеленого (*Green*), и синего (*Blue*). Яркость пикселя (наименьшего элемента изображения) по каждому каналу кодируется числом от 0 до 255.

Цветовая модель *HSV* относится к так называемым перцепционным цветовым моделям, основанных на восприятии цветов. В данной модели используют три канала: тон (*Hue*), насыщенность (*Saturation*) и яркость (*Value*). Первый компонент не несёт никакого цветового значения, а два других характеризуют цветность, то есть являются количественными характеристиками цветов. Данная цветовая модель является аппаратно-независимой [73]. Она содержит в себе как цветовую модель *СМУК*, так и модель *RGB*, поэтому *HSV* можно использовать как основу для безопасного преобразования цветов между этими двумя цветовыми моделями. Модель *HSV* основана на цветах радуги, оттенки цветов измеряются в градусах, определяющих позицию оттенка на цветовом круге [74].

Цветовая модель *HSV* связана с моделью *RGB* нелинейным преобразованием [75, 76]:

$$H = \begin{cases} H_1, \text{ если } B \leq G, \\ 360^\circ - H_1, \text{ если } B > G, \end{cases} \text{ где } H_1 = \arccos \left(\frac{0.5 \cdot [(R - G) + (R - B)]}{\sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}} \right),$$

$$S = \frac{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)}{\max(R, G, B)}, \quad V = \frac{\max(R, G, B)}{255}$$

Цветовая модель *HSV* наиболее эффективна для выделения на изображении областей с различающимися цветами и менее применима для задач, в которых в первую очередь анализируются яркостные свойства изображения [77].

В ряде приложений цвета объектов не играют определяющей роли. В ряде случаев важно получение яркостных характеристик изображения и преобразование его в изображение в оттенках серого (монохромное).

Для того, чтобы ответить на вопрос, какой цветовой канал является предпочтительным, провели тестовую сварку алюминиевой пластины с применением светофильтра перед камерой. На некотором удалении от пластины расположили алюминиевые стержни.

Целью данного эксперимента было выяснение возможности съемки поверхности алюминиевых слитков при плавке их электрической дугой. Исследовалось влияние бокового свечения на область видимости.

Светофильтры для наблюдения электрической дуги, в частности для применения в сварочных масках, изготавливаются из стекла с примесями цветных металлов (медь и никель). Свет дуги и ее отражение от слитков проходя через светофильтр приобретают зеленый оттенок. Покажем на примере процесса горения дуги на алюминиевую пластину. На некотором удалении от пластины располагаются бруски из алюминиевого сплава (рисунок 3.1).

По итогам эксперимента видно, что не происходит засветки матрицы и объекты на удалении от дуги различимы. Использовался сварочный светофильтр с индексом 10 JY 1 (ток дуги составлял 70 А). При больших токах яркость дуги возрастает и указанный фильтр не обеспечивает необходимый уровень светопоглощения и на изображениях часть деталей теряется. Таким образом фильтр необходимо выбирать исходя из яркости дуги, или другими словами выбор определяется относительно рабочего тока дуги.

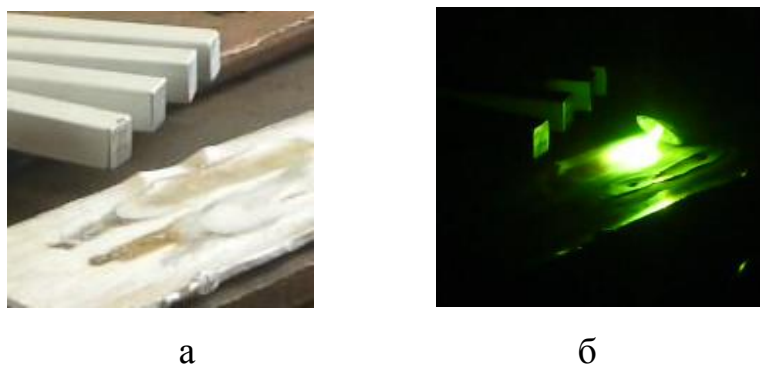


Рисунок 3.1 – Изображение брусков алюминия (а – в дневном свете, б – полученное через светофильтр при горении дуги)

Как правило изображение, зафиксированное камерой, поступает в цифровое устройство обработки данных в виде 3-х матриц (RGB), каждая из которых представляет соответствующий канал цвета. Для работы предложенных во 2-й главе алгоритмов необходим всего один канал цветности (одна матрица описывающая изображение).

Разделим изображение (рисунок 3.1, б) на компоненты, соответствующие различным цветовым пространствам (рисунки 3.2 и 3.3).

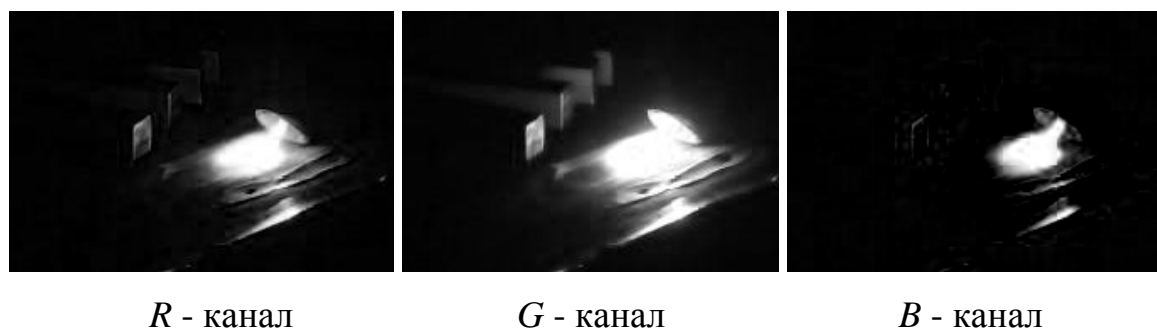


Рисунок 3.2 – Разложение изображения, полученного на выходе светофильтра на цветовые составляющие (пространство RGB)

Канал G изображения содержит наибольшее количество деталей и является самым информативным. В дальнейшем при тестировании предложенных методов анализа изображений будет использоваться именно этот цветовой канал.

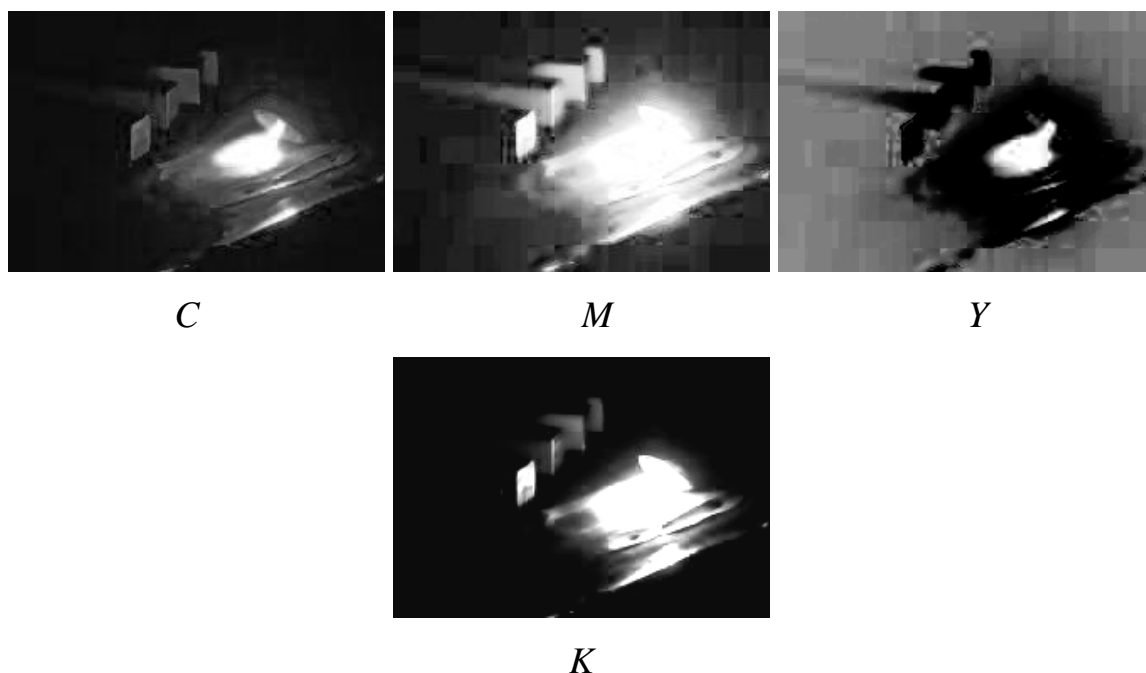


Рисунок 3.3 – Разложение изображения, полученного на выходе светофильтра на цветовые составляющие (пространство *СМУК*)

Если же исходное изображение преобразовать к цветам в оттенках серого, детали также сохраняются, но появляются артефакты связанные с процессом кодирования видео на стороне устройства видеофиксации (кодек MPEG4).

3.2 Система визуального контроля поверхности металла

Агрегатное состояние расплавляемого материала возможно оценить, используя компоненты системы технического зрения (СТЗ).

Установка устройства видеофиксации непосредственно на крышку печи около смотрового окна сопряжено с некоторыми трудностями: относительно высокая температура крышки, вибрации при подъеме и опускании крышки, близость сводового электрода. Для исключения этих факторов на процесс работы предложен способ расположения камеры (рисунок 3.4). Относительно смотрового окна фиксируется зеркало, развернутое на некоторый угол

относительно оси смотрового окна. Изображение с зеркала фиксируется видеокамерой, расположенной на некотором удалении от плавильного агрегата (рисунок 3.5). Данные с камеры с задаваемой периодичностью поступают на ЭВМ, где с помощью специально разработанных алгоритмов обрабатываются. В результате обработки определяется момент полного расплавления слитков алюминиевого сплава и подается сигнал ПЛК о завершении плавки дугой.

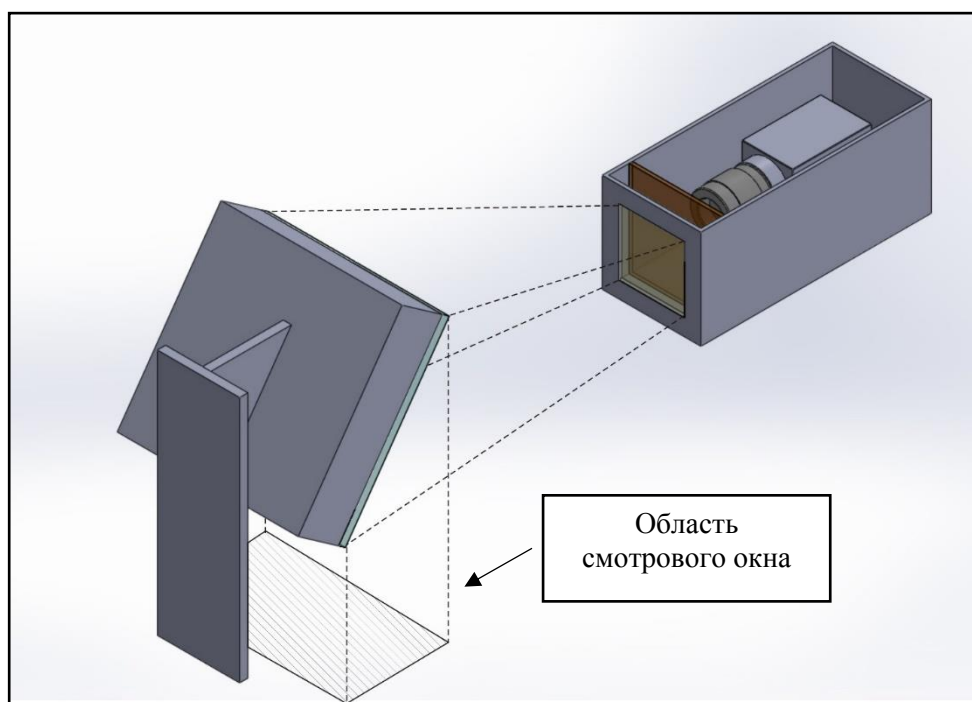


Рисунок 3.4 – Оптическая система

Ввиду того, что камера находится на некотором расстоянии от объекта исследования (в частности смотрового окна, расположенного на сводовой крышке плавильного агрегата), необходимо использовать телеобъектив.

Рассмотрим процесс получения данных об изображении поверхности металла. Многочисленные электромагнитные и некоторые ультразвуковые устройства ввода данных современных систем обработки изображений используют матрицу сенсоров. Такая же конструкция находится внутри подавляющего числа цифровых камер, в которых типичным чувствительным

элементом является матрица на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС), которые выпускаются в виде монолитной конструкции [78].

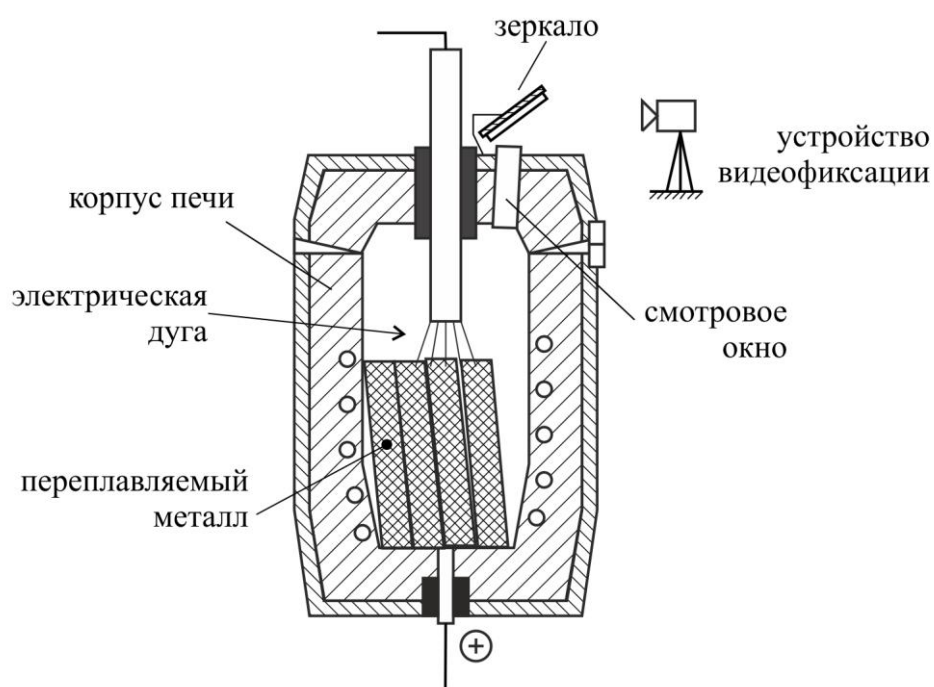


Рисунок 3.5 – Расположение оборудования при съемке поверхности металла

ПЗС-матрицы широко используются в цифровых фото- и видеокамерах, а также других светочувствительных приборах. Ответная реакция каждого элемента пропорциональна интегралу световой энергии, попадающей на поверхность этого элемента за время экспозиции [79, 80].

Энергия, излучаемая источником освещения, отражается от объекта сцены (рисунок 3.6).

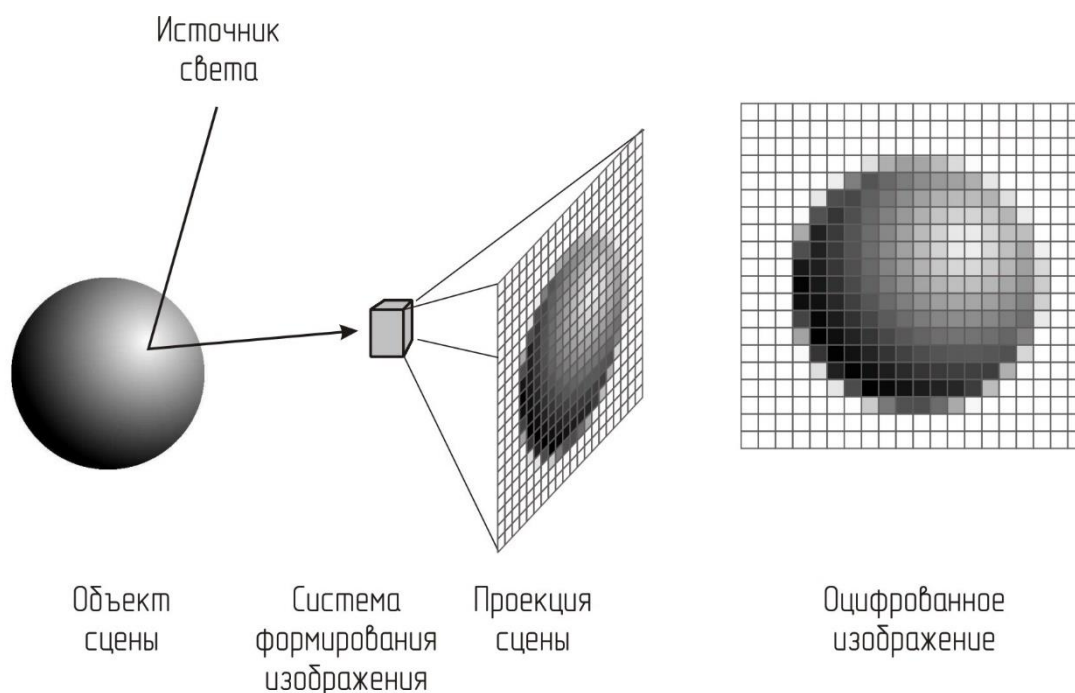


Рисунок 3.6 – Процесс регистрации цифрового изображения

Функция, выполняемая системой формирования изображения, состоит в том, чтобы собрать поступающую энергию и сфокусировать ее на плоскости изображения. Если для освещения используется источник видимого света, то на входе системы формирования изображения имеется объектив, который проецирует наблюдаемую сцену на плоскость изображения. Совмещенная с этой плоскостью чувствительная матрица генерирует набор выходных сигналов, каждый из которых пропорционален интегралу световой энергии, принятой соответствующим сенсором. Выходной сигнал формируется в процессе последовательного опроса сигналов всех фоточувствительных элементов встроенным электронным коммутатором. С помощью цифровой и аналоговой электроники эти выходные сигналы поочередно преобразуются в комплексный видеосигнал. Тот факт, что регистрация двумерного сигнала осуществляется дискретно расположенными в пространстве сенсорами, обеспечивает пространственную дискретизацию сигнала; квантование его осуществляется в следующем блоке системы формирования изображения. На выходе ее получается цифровое изображение [81, 82].

Для сбора поступающей с камеры изображения необходимо использовать плату видеозахвата, которая устанавливается в слот материнской платы персонального компьютера. Существуют модели, выступающие в качестве модулей ввода/вывода, устанавливаемые в шасси программируемого логического контроллера [83].

Ввиду того, что камера будет находится на некотором удалении от устройства сбора данных необходимо использовать интерфейс, поддерживающий передачу информации (изображение, фиксируемое камерой) на расстояние более 10 м. Приведем сравнительную таблицу интерфейсов видеокамер (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Основные характеристики наиболее востребованных в приложениях машинного зрения интерфейсов [84]

Характеристика	FireWire (IEEE 1394b)	Gigabit Ethernet	USB 2.0	USB 3.0	Camera Link
Полоса пропускания	64 Мбит/с	100 Мбит/с	40 Мбит/с	350 Мбит/с	680 Мбит/с
Длина кабеля	4,5 м	100 м	4,5 м	3 м	10 м
Загрузка ЦП	Низкая	Средняя	Низкая	Низкая	Средняя
Признание пользователей	Среднее	Превосходное	Превосходное	Превосходное	Низкое
Сложность системной интеграции	Средняя	Низкая	Средняя	Низкая	Высокая
Стоимость системы (система из одной камеры)	Средняя	Средняя	Самая низкая	Низкая	Высокая
Мультиплексирование	Нет	Допустимо	Нет	Нет	Нет
Стандарт	IIDC/DC AM	GigE Vision	Нет	USB3 Vision	Camera Link

В соответствии со спецификацией наибольшим запасом по длине кабеля выступает интерфейс *Gigabit Ethernet* с протоколом передачи данных *GigE Vision*. Отмечают следующие преимущества видеокамер с интерфейсом *GigE Vision* [85]:

– отсутствует необходимость во фреймграбберах и специальных кабелях для работы с камерой в системе машинного зрения;

– протокол *GigE Vision* совместим с сетевым оборудованием для *GigE*, что позволяет использовать стандартное оборудование для подключения видеокамер к сети;

– возможность подачи питания на камеру через интерфейсный кабель при использовании *GigE Vision PoE*.

3.3 Программное обеспечение

Наряду с аппаратной частью системы необходимо программное обеспечение для обработки поступающих изображений [86, 87]. В связи с тем, что существует множество сред разработки для микроконтроллеров и персональных компьютеров, представлены алгоритмы, которые возможно реализовать на любом языке программирования.

Предложен следующий алгоритм обработки изображений, полученных с помощью устройства видеофиксации (рисунок 3.7).

Работа программы начинается с получения изображения и загрузки его в память вычислительного устройства. Как правило вместе с оборудованием для съемки производителями предоставляются необходимые библиотеки для работы с потоком видео, где в том числе реализованы функции для выделения кадров из видеопоследовательности. Также на официальных сайтах представлены примеры программ (код) для работы с предоставляемым устройством [88, 89].

В связи с тем, что для работы алгоритма необходимо монохромное изображение (которое фактически представляет из себя матрицу интенсивностей отраженного от поверхности слитков освещения) из *RGB* изображения выделяется зеленый канал цветности (*G*-канал). В случае работы с черно-белой камерой процедура выделения канала не требуется.

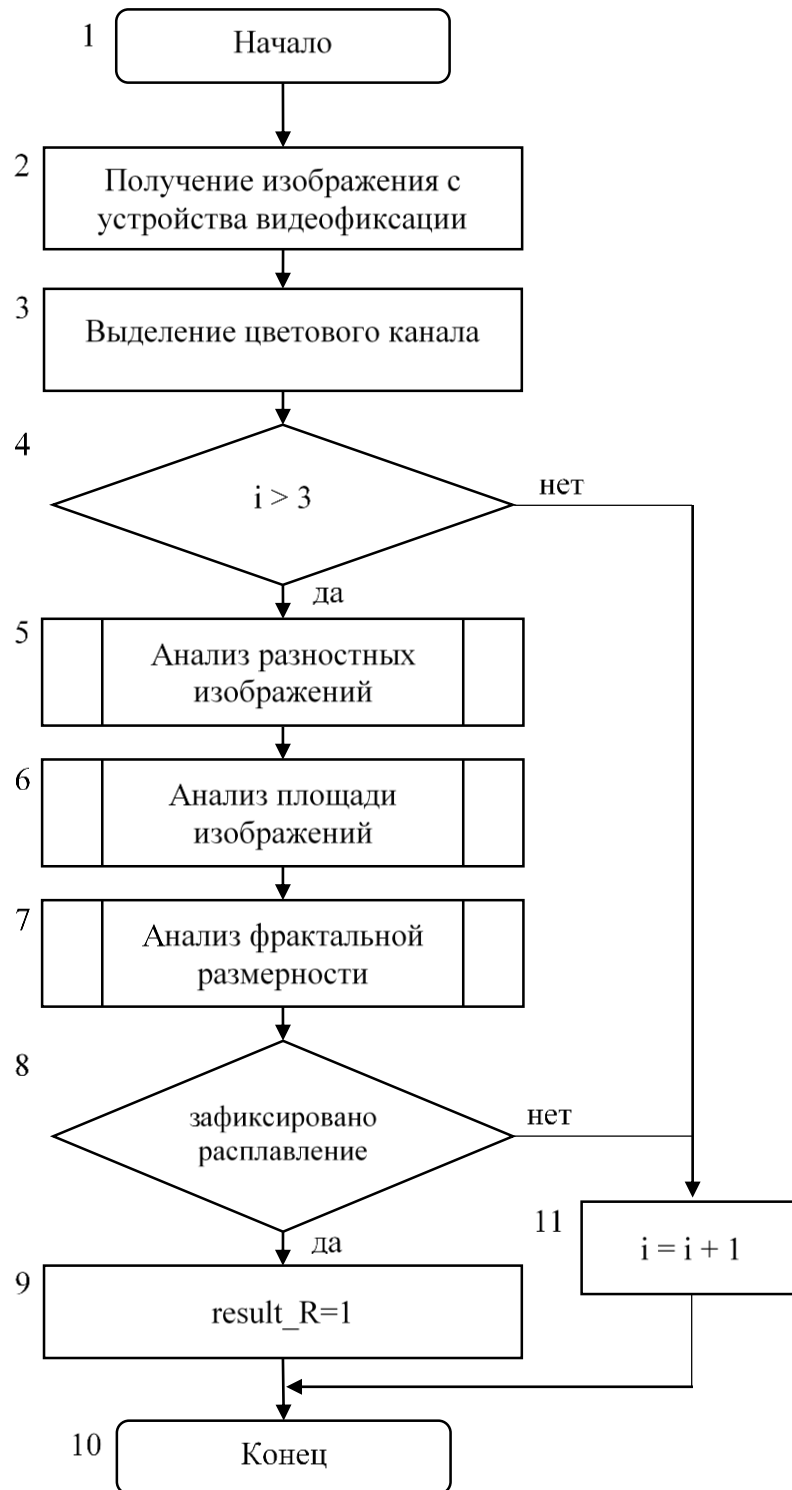


Рисунок 3.7 – Укрупненный алгоритм определения агрегатного состояния

Далее следуют подпрограммы анализа поступающей информации (изображений), выходными параметрами которых является ответ на вопрос об

окончании фазового перехода металл-расплав. По совокупности решений вырабатывается управляющий сигнал об окончании плавки дугой постоянного тока.

Рассмотрим подробно работу подпрограмм, содержащихся в основном алгоритме.

Подпрограмма *«Анализ разностных изображений»*. Работа подпрограммы (рисунок 3.8) начинается с блока вычитания двух последовательных изображений, разделенных временным промежутком. Производится процедура вычисления порога, необходимого для последующей бинаризации. Порог определяется на основании выбора максимального значения разности интенсивностей яркости за некоторый промежуток времени, соответствующий, например, двумстам измерениям. После выделения величины порога в начале плавки, разностные изображения подвергаются бинаризации. В итоге, если на разностных бинаризованных изображениях появляются области, где значения яркости выше пороговой, считаем, что началось плавление слитков. Проводится подсчет областей выше порога (областей различий) и ведется накопление данных с дальнейшим анализом. Подробное рассмотрение блоков приводится в соответствующих разделах главы.

Подпрограмма *«Анализ площади изображений»*. Изображение, поступившее в подпрограмму (рисунок 3.9), подвергается математической обработке с целью определения площади его поверхности.

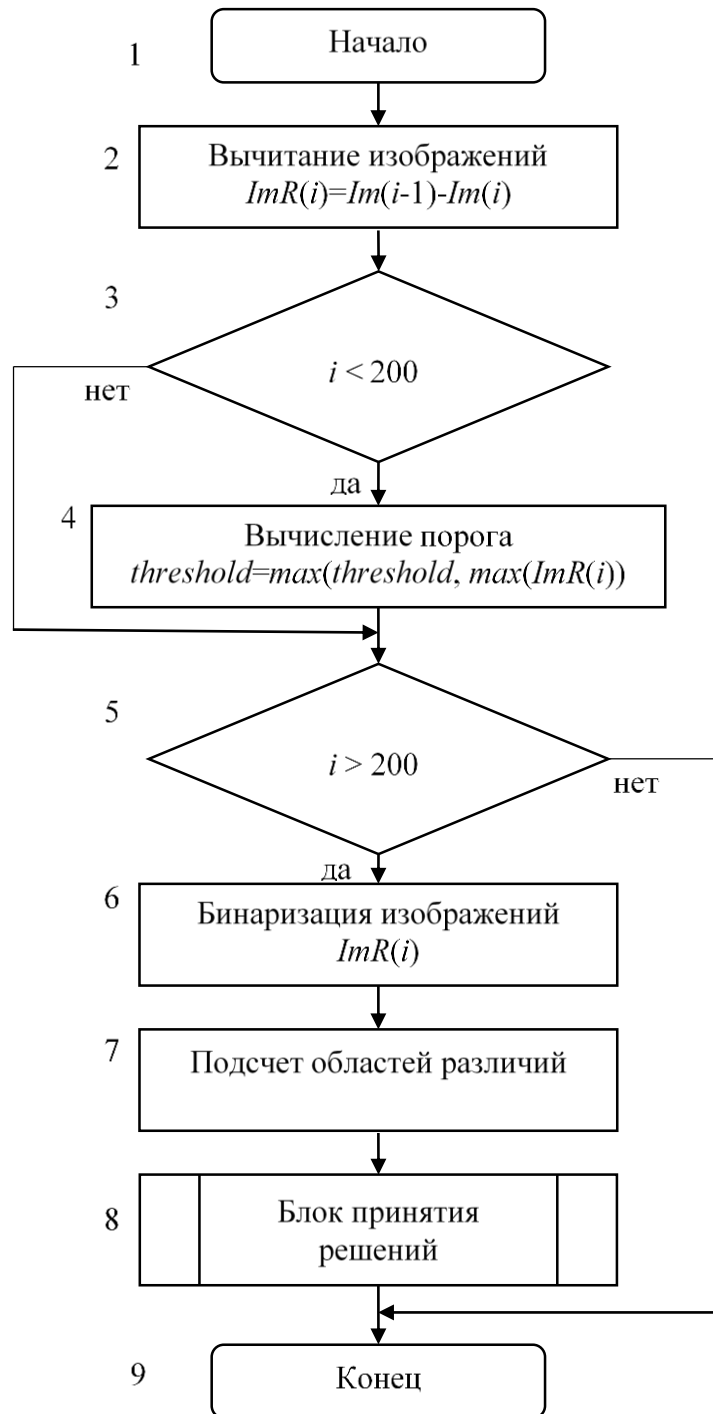


Рисунок 3.8 – Блок-схема подпрограммы «Анализ разностных изображений»

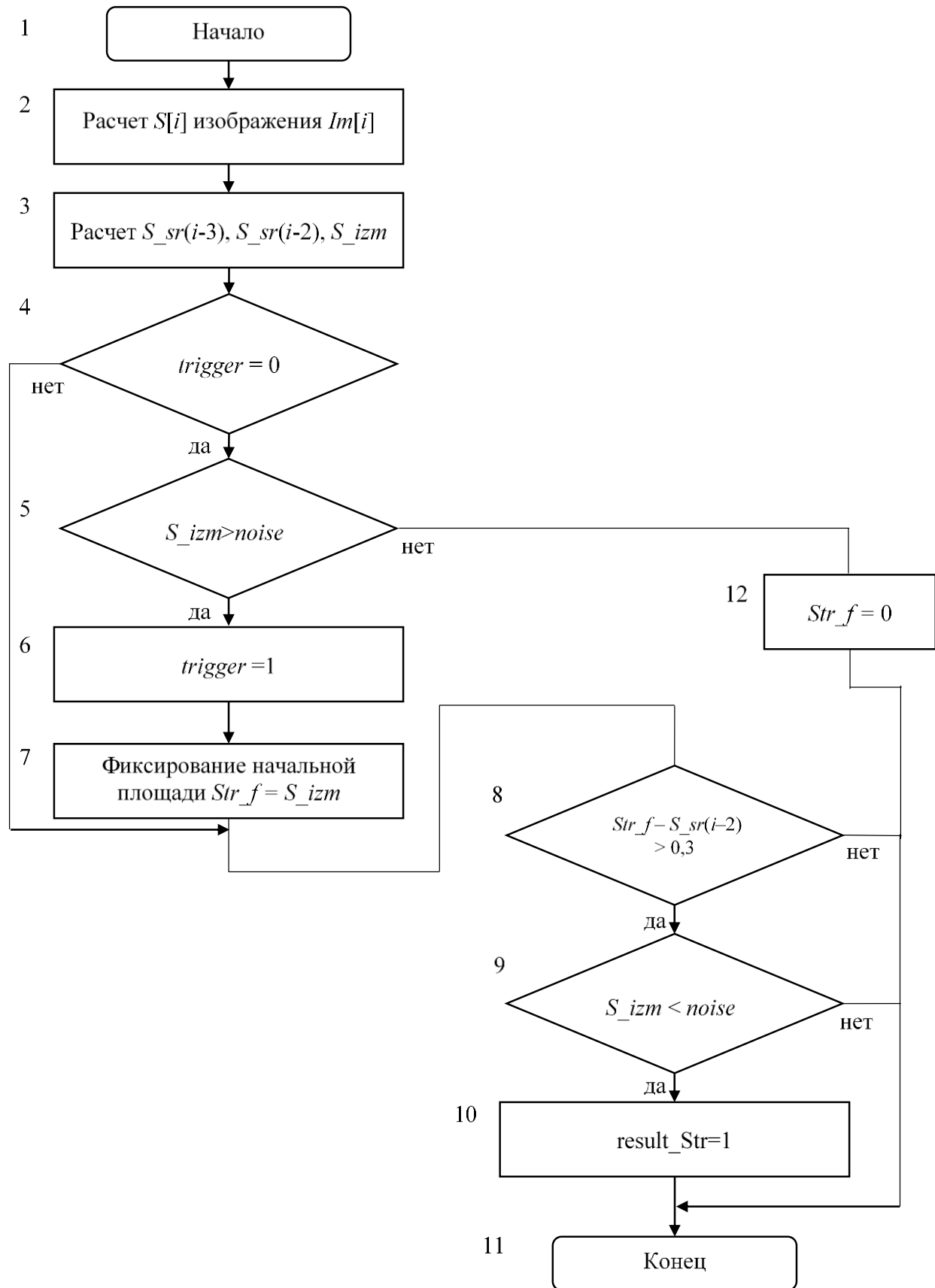


Рисунок 3.9 – Блок-диаграмма подпрограммы «Анализ площади изображений»

Под поверхностью изображения понимается поверхность, образованная различающейся яркостью пикселей рассматриваемого изображения (яркие участки располагаются выше остальных участков). В начале плавки вычисляется степень изменения значения площади последовательно поступающих изображений (параметр *noise* – разброс значений). При превышении значения изменения площади параметра *noise* происходит фиксация момента начала процесса изменения агрегатного состояния слитков. В дальнейшем идет расчет величины снижения значения площади относительно фиксированного значения (блок 8) и при превышении значения 0,3 ожидается снижение уровня площади до величины ниже параметра *noise*. При соблюдении условий считается, что плавление завершено.

Подпрограмма «Анализ фрактальной размерности». Работа подпрограммы аналогична работе подпрограммы «Анализ площади изображений» за исключением того, что основным параметром является значение фрактальной размерности, степень падения фрактальной размерности принимается 0,03.

3.3.1 Вычитание изображений

Блок учитывает специфику хранения изображения в памяти компьютера. Изображения видимого спектра получаемое с помощью устройств видеофиксации включает в себя 3 цветовых составляющие красную (*R* – канал), зеленую (*G* – канал) и синюю (*B*-канал). В свою очередь каждая составляющая содержит матрицу значений интенсивности от 0 до 255. Таким образом, для хранения изображения используется массив целочисленных 8 битных переменных.

Ниже показан пример вычитания изображений друг из друга (рисунок 3.10). Видно, что результаты вычитания изображений ($A-B$) и ($B-A$) неравнозначны.

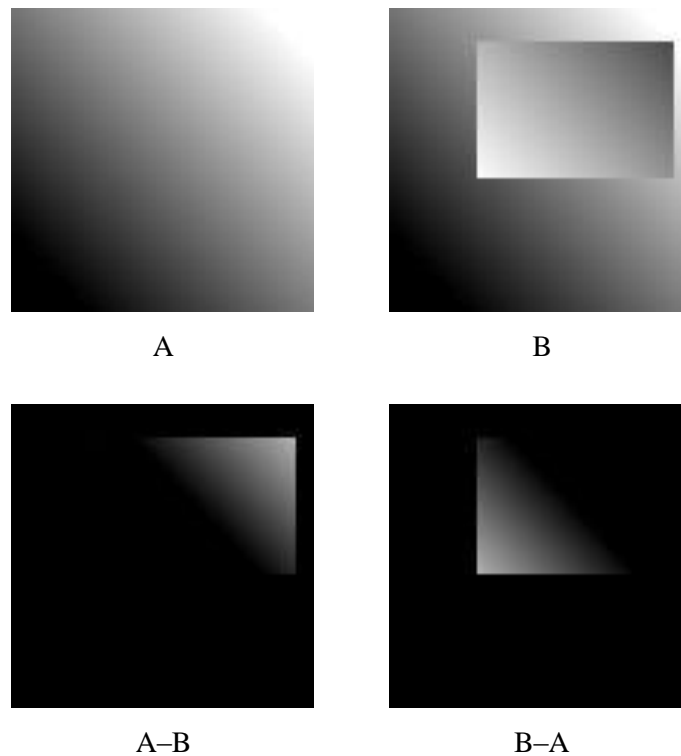


Рисунок 3.10 – Результат вычитания изображений в 8-битном формате

Это связано с тем, что получаемые при вычитании отрицательные числа приравниваются к нулю. Для исключения данного эффекта необходимо перейти к 16-битному формату представления данных. В данном формате возможно задавать числа в диапазоне $[-2^{15} \dots 2^{15}-1]$. Для возможности обратного перехода в 8-битный формат вычитание изображений нужно производить по модулю (рисунок 3.11):

$$Im_{rez}(x, y) = |Im1(x, y) - Im2(x, y)|.$$

Переход к 16-битному формату влечет за собой применение большего количества оперативной памяти для проведения операции вычитания. Кроме того, процессорное время будет затрачиваться на преобразование типов.

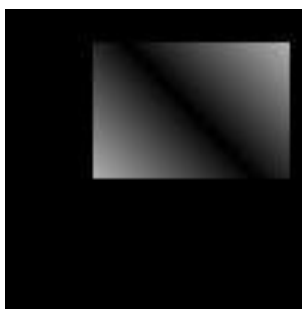


Рисунок 3.11 – Результат вычитания изображений по модулю в 16-битном формате

Можно произвести процедуру вычитания, не переходя в 16-битный формат. Для этого операцию вычитания нужно произвести дважды.

$$Im_{AB} = A - B,$$

$$Im_{BA} = B - A.$$

Для получения разностного изображения найденные значения складываются $Im_{rez} = Im_{AB} + Im_{BA}$. Результат вычитания получается аналогичен результату, полученному ранее. Ниже приведена таблица 3.3, показывающая все этапы вычисления.

Таблица 3.3 – Результаты вычисления разности изображений

Операция	Разрядность, бит	Интенсивность				
		0	100	150	200	250
исходное изображение A	8	0	100	150	200	250
исходное изображение B	8	250	200	150	100	0
$Im_{AB} = A - B$	8	0	0	0	100	250
$Im_{BA} = B - A$	8	250	100	0	0	0
$Im_{AB} + Im_{BA}$	8	250	100	0	100	250
$A - B$	16	-250	-100	0	100	250
$ A - B $	16	250	100	0	100	250

Для оценки времени операции вычисления разностного изображения в различных форматах (8- и 16-битном) была использована программа *MATLAB*. В качестве тестовых изображений были использованы две пары изображений

с различными разрешениями. Вычислены разностные изображения и измерено время операции.

В таблице 3.4 указаны усредненные значения по 100 измерениям.

Таблица 3.4 – Время вычисления разностного изображения

Размер изображения, пиксели	Время вычисления, с	
	с переводом в 16-битный формат	без перевода в 16- битный формат
100x100	$4,54 \cdot 10^{-4}$	$7,45 \cdot 10^{-5}$
1000x1000	0,0416	0,0120

Видно, что из-за необходимости производить преобразование типов, время операции увеличивается.

Рассмотрим пример вычитания изображений на реальном объекте (рисунок 3.12). На изображении *В* программно повернут один пруток алюминия (показан стрелкой). Изображения (*А–В*) и (*В–А*) не дают полной информации о произошедших изменениях состояния материала в тигле (черный цвет – различий между изображениями нет). Результат вычитания представлен на рисунке 3.13.

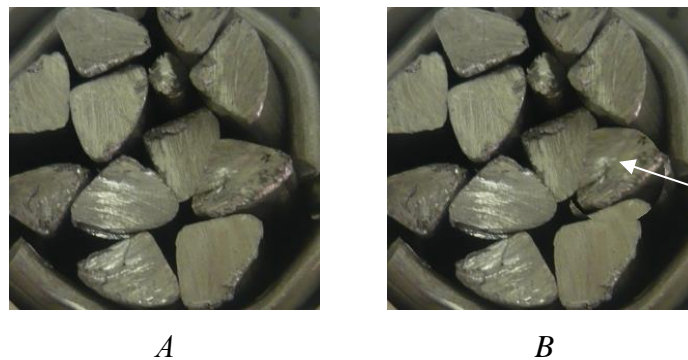


Рисунок 3.12 – Изображения прутков алюминия

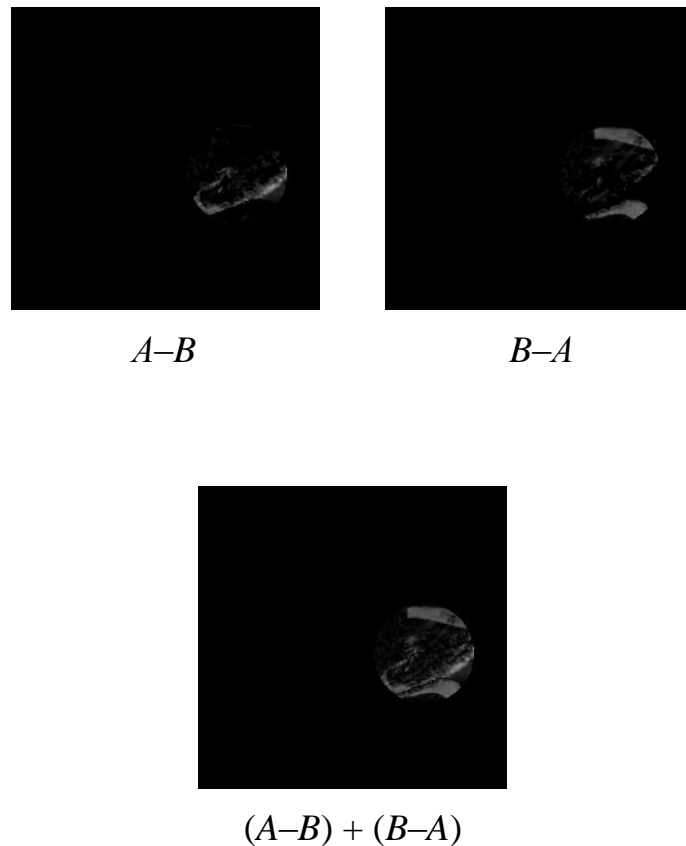


Рисунок 3.13 – Математические операции с изображениями

3.3.2 Анализ бинарного изображения

На рисунке 3.14 представлен алгоритм работы «Блока принятия решения». Блок принятия решения работает с массивом данных X , содержащего в себе сведения о проценте белых областей бинаризованных изображений (другими словами, проценте различающихся участков изображений). Последний элемент массива соответствует бинаризованной разности двух последних во времени изображений.

После получения массива с данными, алгоритм модуля начинает рассчитывать производные в каждой точке $dx_i = x_i - x_{i-1}$, где x – элемент массива. Далее идет определение сигма функции:

$$\sigma = \begin{cases} 1, & \text{если } dx > 0 \\ -1, & \text{если } dx < 0 \\ 0, & \text{если } dx = 0 \end{cases}$$

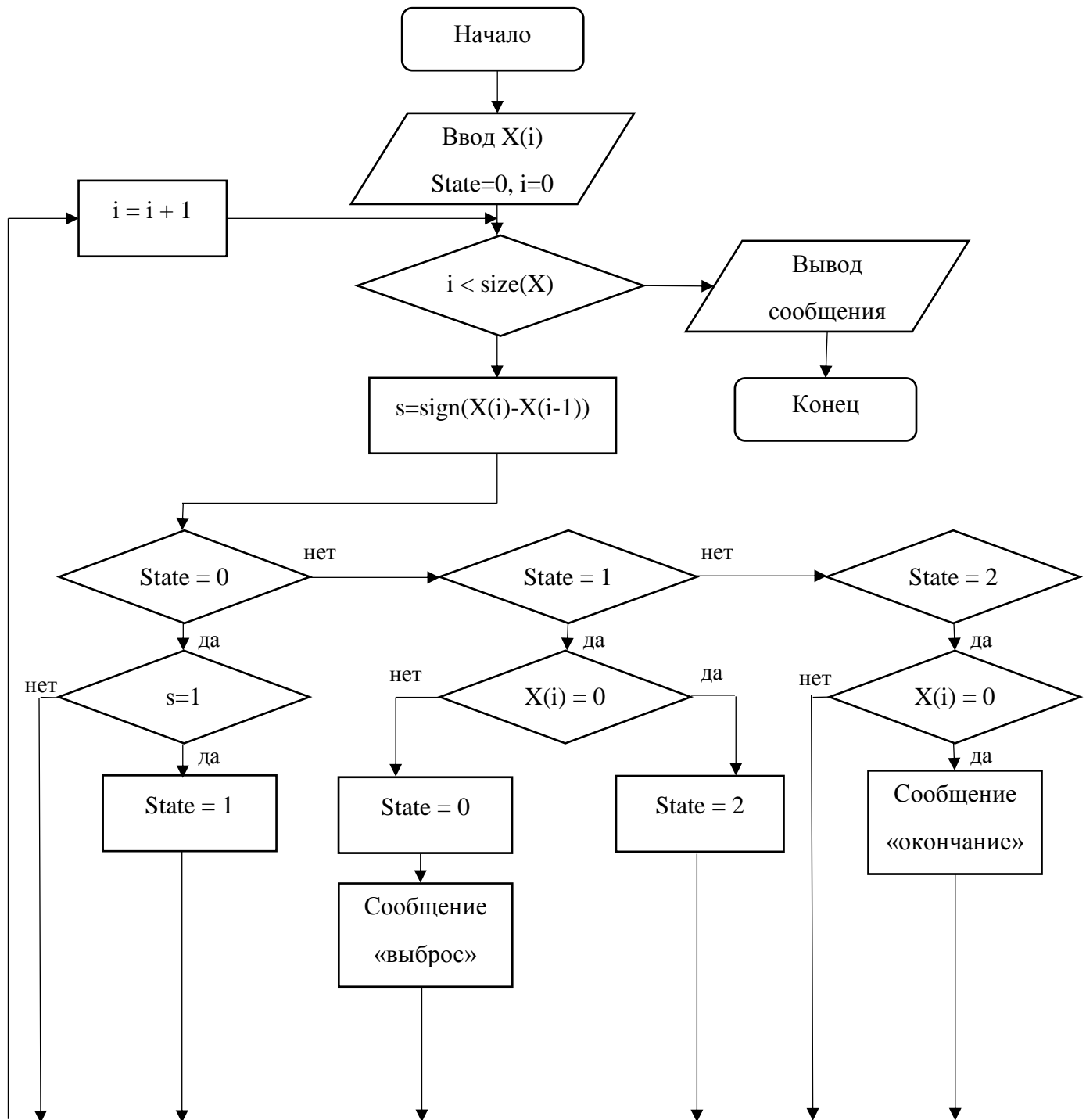


Рисунок 3.14 – Алгоритм работы блока принятия решений

Таким образом $\sigma = 1$ означает, что началось расплавление металла и происходит изменение его поверхности. Алгоритм начинает следить за значениями поступающих данных. Если после обнаружения начала расплавления следующим значением x будет 0, то это воспринимается как ошибка измерения («выброс»). Если значение x будет отлично от нуля, то происходит слежение за значениями. После полного расплавления, поверхность металла становится статичной и на разностном, и соответственно на бинаризованном изображении, не будут проявляться светлые области. Значение x в этом случае сравнивается с нулем. При появлении $x = 0$ алгоритм принимает решение о приостановке плавки с помощью дугового нагрева (выдает сигнал «окончание») [90].

3.4 Выводы по главе 3

1. Предложена оптическая система, основанная на трансляции изображения поверхности переплавляемого металла на устройство видеофиксации, расположенного на заданном расстоянии от плавильного агрегата.

2. При обработке изображений, содержащих в себе распределение освещения от слитков, прошедшего через светофильтр смотрового окна, предпочтительно использовать зеленую составляющую изображения (*G* канал изображения *RGB*).

3. Разработан алгоритм работы программы определения агрегатного состояния переплавляемого материала, включающий в себя блоки «Анализ разностных изображений», «Анализ площади изображений», «Анализ фрактальной размерности» выходной информацией которых является сообщение об окончании фазового перехода.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ВРЕМЕНИ ПЕРЕХОДА МЕТАЛЛА ИЗ ТВЕРДОГО СОСТОЯНИЯ В ЖИДКОЕ В ПЛАВИЛЬНОМ АГРЕГАТЕ С 2-МЯ ИСТОЧНИКАМИ НАГРЕВА

4.1 Плавильный агрегат с 2-мя источниками электрического нагрева как объект управления

Печь представляет собой стальной кожух 1 (рисунок 4.1), футерованный изнутри шамотной массой. Для снижения тепловых потерь между футеровкой и кожухом располагают несколько рядов асбесто- и базальто- картона. Кожух крепится с возможностью наклона в опорах 2; положение его фиксируется конечными выключателями.

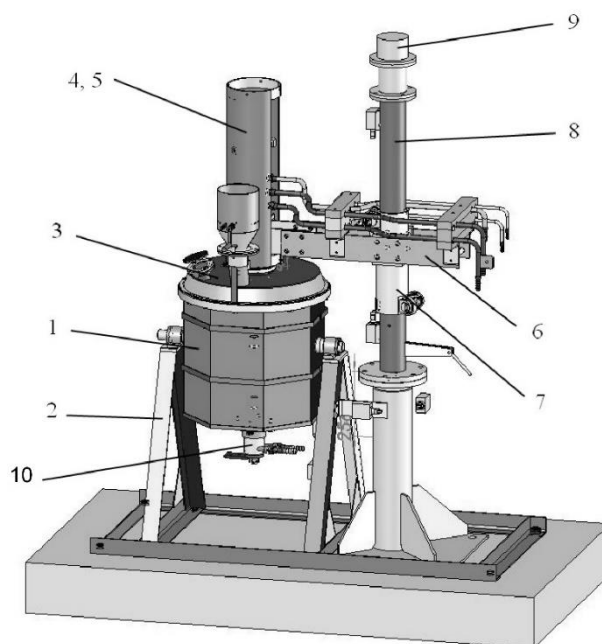


Рисунок 4.1 – Схема лабораторной печи комбинированного нагрева

Тигель печи герметично закрывается футерованной крышкой 3, через которую вдоль вертикальной оси перемещается в вакуумном уплотнении водоохлаждаемый стальной шток 4, на котором закреплен графитированный электрод 5. В нем имеется отверстие для подачи аргона. Стальной шток

закреплен в кронштейнах 6, и к нему подводится от выпрямителя минусовый потенциал. Кронштейны с помощью каретки 7 перемещаются вдоль стойки 8 с ограничением пути конечными выключателями. Асинхронный двигатель 9 перемещения электрода регулируется преобразователем частоты, выполненным на транзисторах *IGBT*.

В нижней части кожуха печи закреплен водоохлаждаемый подовый электрод 10, к которому подводится плюсовой потенциал от выпрямителя, схема которого приведена на рисунке 4.2. В нем от автоматического выключателя АВ напряжение трехфазной сети 380 В поступает на первичную *W1* обмотку разделительного трансформатора *Tr*, на вторичной стороне которого имеются две трехфазные обмотки *W2*, к каждой из которых подключен тиристорный выпрямитель *B1* (*B2*). На выходе одного блока можно получить напряжение холостого хода (U_{dxx}) 120 В и номинальный ток (I_H) 250 А. С помощью тиристорного ключа *K* эти блоки можно соединять последовательно и параллельно [91].

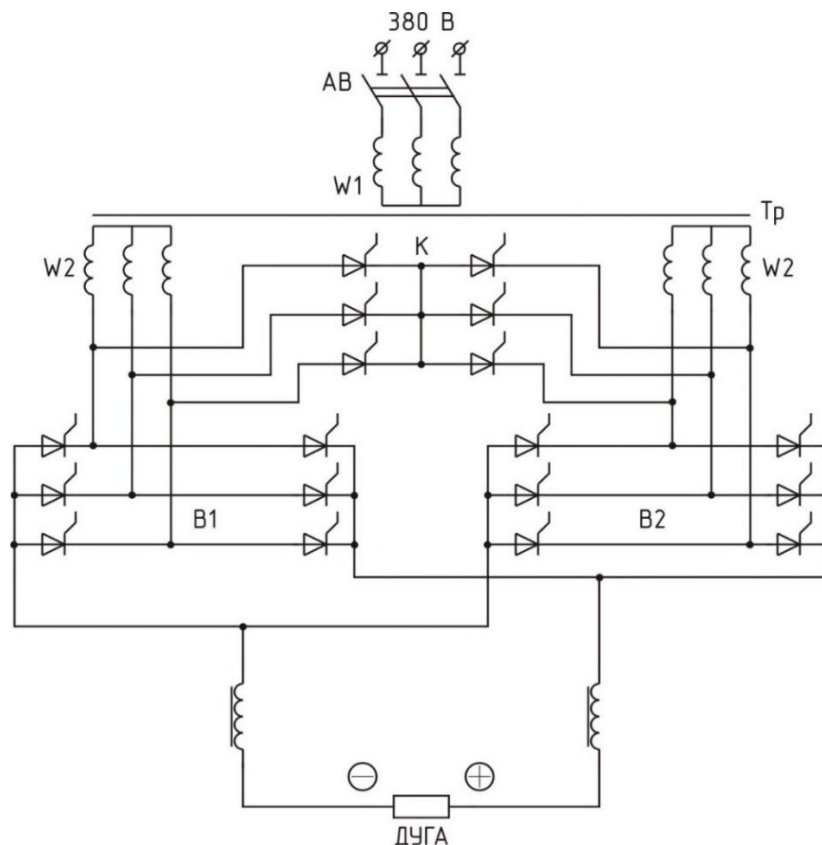


Рисунок 4.2 – Схема выпрямительного агрегата

В начальный момент плавки на холодную шихту дугу замыкают при последовательном включении блоков, когда напряжение холостого хода 240 В, а номинальный ток 250 А. По мере прогрева шихты блоки переключают параллельно с выходными параметрами: напряжение холостого хода 120 В и номинальный ток 500 А. Для обеспечения устойчивого горения дуги в цепь включен реактор Р с индуктивностью 0,5 мГн. Величина тока в процессе плавки может изменяться плавно от 0 до I_n , а его заданное значение автоматически поддерживается регулятором тока.

Для проведения плавки этим методом сопротивления в футеровку печи вмонтирован спиральный нагреватель из нихрома, допускаемая температура разогрева которого 1150 °С, мощностью 6 кВт с контрольной термопарой T_n . От однофазной сети, напряжением 220 В питание на нагреватель поступает через однофазный тиристорный регулятор напряжения РНТО, который позволяет плавно менять мощность спирали. Заданная температура футеровки 700; 800; 900 °С автоматически поддерживается тепловым регулятором ВРТ.

Мощность 6 кВт выбирали из следующих соображений:

По техническим данным промышленных тигельных печей сопротивления типа САТ (емкостью 150; 250; 500 кг) рассчитывали удельную мощность на 1 кг жидкого сплава:

$$\frac{40 \text{ кВт}}{150 \text{ кг}} = 0,27 \text{ кВт/кг} ; \quad \frac{60 \text{ кВт}}{250 \text{ кг}} = 0,24 \text{ кВт/кг} ; \quad \frac{80 \text{ кВт}}{500 \text{ кг}} = 0,16 \text{ кВт/кг} .$$

Максимальная масса твердого слитка, входящего в тигель лабораторной печи, составляет 6 кг. Тогда необходимая мощность – $0,27 \text{ кВт/кг} \cdot 6 \text{ кг} = 1,62 \text{ кВт}$. Учитывая, что с уменьшением емкости печи тепловые потери возрастают, мощность нагревателей увеличили до 6 кВт, то есть удельная мощность возросла в $(6 \text{ кВт}/1,62 \text{ кВт}) \sim 4$ раза и составила около 1 кВт/кг.

Автором проведен ряд опытов, включающий следующие варианты нагрева и плавления. Результаты опубликованы в [42].

Вариант 1. Нагрев и плавление только методом сопротивления. В печь с температурой футеровки 700 °С загрузили 6 кг слитков, накрыли крышкой, регулятором напряжения установили мощность 6 кВт.

Вариант 2. Плавка в дуговой печи постоянного тока (нагрев сопротивлением отключили). Промышленными плавками нагрели футеровку до 700 °С, загрузили 6 кг слитков, накрыли крышкой, включили источник питания дуги. Фактически вводимая мощность 45 кВт.

Вариант 3. Нагрев и плавление одновременно дугой и сопротивлением. Включили нагрев сопротивлением 6 кВт и довели температуру футеровки до 700 °С. Загрузили 6 кг слитков, накрыли крышкой, включили аргон и источник питания дуги. Фактическая вводимая мощность 36 кВт. По окончании расплавления дугу отключили, а до температуры расплава 720 °С доводили только нагревом сопротивлением (6 кВт).

В результате подбора величины тока (450 А), при котором практически на поверхности слитка не образовывалась ванна металла даже под дугой, слиток прогревался теплопроводностью сверху до момента, когда вся его масса не достигла температуры плавления и он одновременно перешел в жидкую фазу.

Процессы окисления металла и образования карбидов резко уменьшили за счет расплавления слитка дугой при горячей футеровке с последующим (после расплавления) отключением дуги и подогревом только нагревателями до 720 °С, а также применением аргона.

В [92] приведено исследование (выполнено автором), показывающее эффективность плавки дугой алюминиевых слитков и целесообразность введения двух источников электронагрева.

очередь подключен к нагревателям. Для контроля температуры печи в футеровку монтируется термопара, подключаемая к регулятору температуры.

Плавление металла осуществляют дугой, возникающей при протекании тока через замкнутую электрическую цепь, включающую сводовый электрод 6, межэлектродный промежуток 9, шихту 11, образующийся расплав, подовый электрод 12, токопроводы, регулятор тока 16. Управление изменением тока на регуляторе тока РТ осуществляется с помощью микропроцессорного блока 18.

Управление длиной дуги производится формированием управляющего воздействия для управляемого реверсивного преобразователя 2, который подключен к электродвигателю механизма перемещения 5 электрода 6.

Состояние сводовой крышки фиксируется с помощью оконечного датчика положения 13.

Фиксация поверхности металла с целью оценки его агрегатного состояния осуществляется с помощью устройства видеофиксации 7 визированного на указанную поверхность.

Обработка поступающей информации (изображения поверхности) осуществляется персональным компьютером 25 с установленной платой захвата изображения. На основании непрерывного анализа поступающих изображений поверхности слитков (с применением разработанных алгоритмов) выявляется момент перехода металла в расплавленное состояние и формируется сигнал "Металл расплавился", что служит критерием для отключения электрического контура дугового нагрева.

4.3 Разработка алгоритма управления плавильного агрегата с 2-мя источниками электрического нагрева

В исходном состоянии высоковольтный выключатель ВВ отключен, электрод – катод находится в крайнем верхнем положении, рукоятка управления режимом АВТ/РУЧН находится в положении РУЧН; электропечь

находится в вертикальном положении, система охлаждения водой элементов печи и выпрямительного агрегата отключена.

В контроллер вводят исходные данные:

T_{z1} – температура нагрева футеровки до момента загрузки шихты (режим 1), °C;

T_{z2} – температура разливки металла, °C;

T_{krit} – критическая температура нагревателей, °C;

U_d – напряжение дуги, В

ΔU – величина разбаланса напряжения, В

U_{dmax} – предельное максимальное значение напряжения, В

U_{dm} – предельное минимальное значение напряжения, В

T_1, T_2 – времена задержки для регулятора длины дуги, с

I_{dm} – минимальное значение тока, А

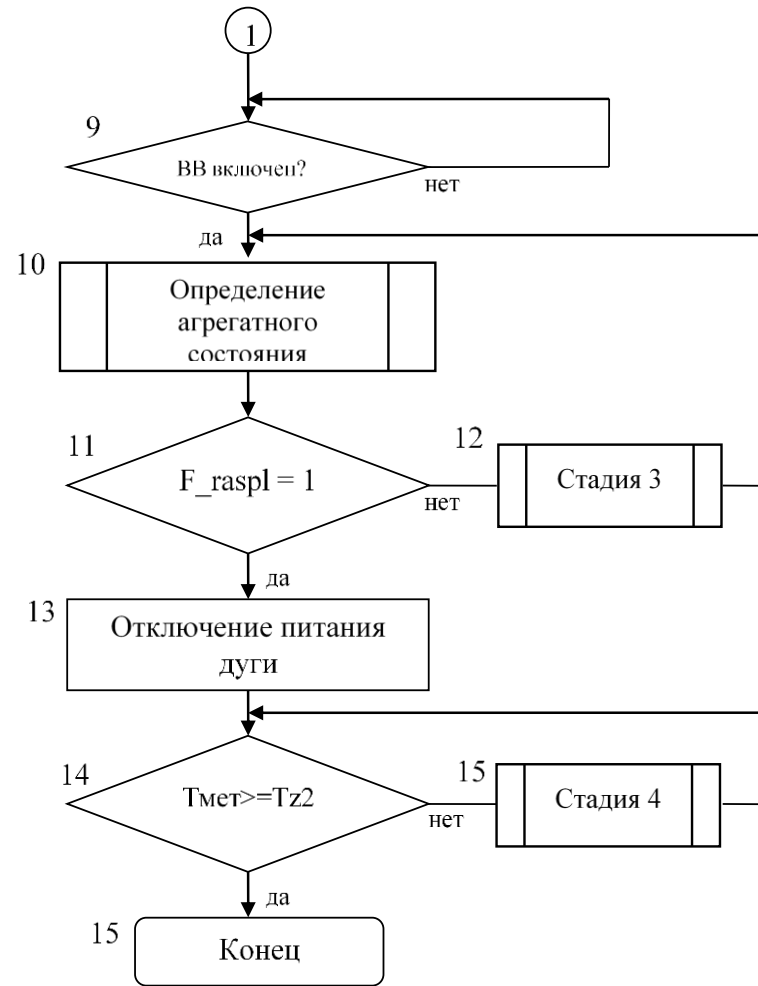
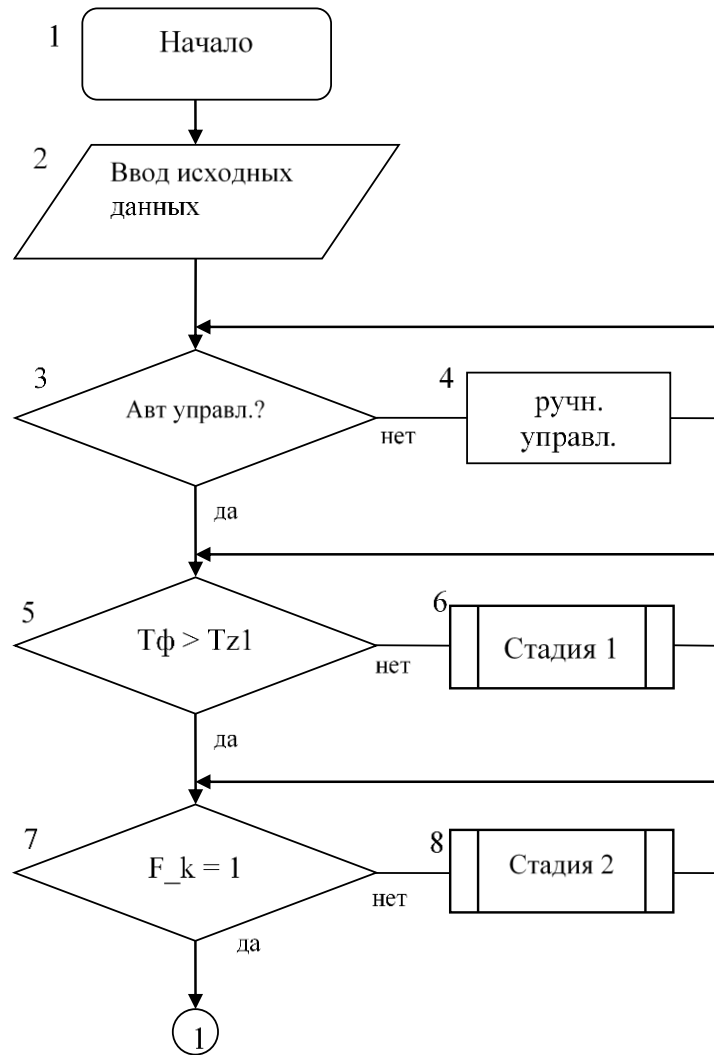
На первом этапе контроллер проверяет состояние высоковольтного выключателя (ВВ). Также проверяется состояние датчика конечного положения сводовой крышки печи с целью определения ее положения. Состояние ВВ отображается на мнемосхеме пульта управления (АРМ оператора)

Следующим этапом работы контроллера идет проверка режима работы, который задается положением переключателя АВТ/РУЧН.

При ручном режиме управления приоритет отдается сигналам с пульта управления.

В целом алгоритм управления можно разбить на 4 стадии (рисунок 4.4):

– нагрев футеровки с помощью нагревателей сопротивления при закрытой сводовой крышке до температуры, превышающей температуру плавления алюминия (700 °C);



Tф – текущая температура футеровки

Tz1– заданная температура футеровки

Tz2– заданная температура расплава

Tмет – текущая температура маталла

F_k – флаг состояния сводовой крышки (0 – крышка открыта, 1 – крышка закрыта)

F_raspl – флаг агрегатного состояния шихты (1 – шихта полностью расплавлена)

Рисунок 4.4 – Блок-схема основной программы контроллера

- поднятие сводовой крышки и загрузка шихты, при этом регулятором компенсируются потери тепла;

- закрытие крышки, ввод высококонцентрированной энергии дугового разряда, формируемого в цепи сводовый электрод - дуговой промежуток - шихта - подовый электрод;

- после перехода шихты в жидкое состояние, отключение дуги и продолжение нагрева расплава с помощью нагревателей сопротивления до температуры разливки.

На первой стадии контроллер опрашивает датчик температуры (рисунок 4.5), помещенный в футеровку печи. Преобразованный из аналогового в цифровой сигнал передает значение температуры в контроллер, значение температуры отображается на мониторе оператора.

При температуре футеровки ниже заданной контроллером формируются сигналы управления для тиристорного блока, который в свою очередь задает мощность, подаваемую на нагреватели сопротивления. По мере приближения к заданной температуре футеровки, подаваемая мощность на нагреватели снижается. Одновременно опрашивается датчик температуры, установленный на кожухе печи. По разности температур контроллер оценивает степень износа футеровки и количество теплотерь (суммарные теплотери).

При достижении заданного значения температуры футеровки, контроллер переходит в режим поддержания температуры (рисунок 4.6), при этом формируется светозвуковой сигнал окончания данного этапа. Сигнал снимается после поднятия сводовой крышки. Состояние крышки определяется с помощью датчика конечного положения сводовой крышки, который формирует дискретный сигнал, по величине которого контроллер устанавливает флаг F_k (значение флага 0 – крышка открыта, 1 – крышка закрыта). Контроллер переходит к стадии 2, т.е. идет поддержание заданной температуры T_{z1} и ожидание сигнала с датчика конечного положения крышки.

При закрывании крышки в контроллере флаг F_k переходит в значение 1, и контроллер переходит к реализации третьей стадии (рисунок 4.7).

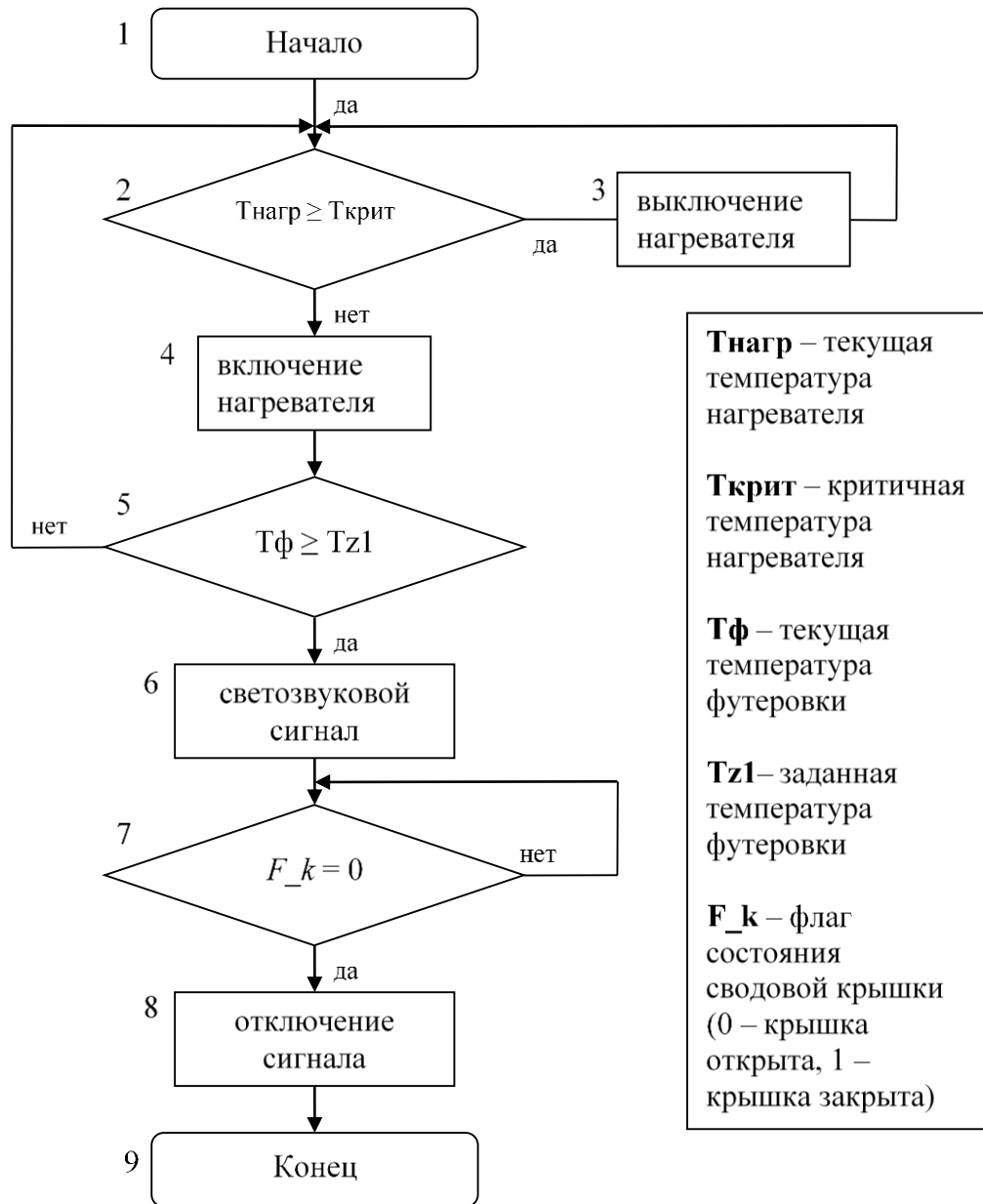


Рисунок 4.5 – Блок-схема подпрограммы "Стадия 1"

Стадия 3 начинается с команды на включение контура охлаждения плазматрона и подового электрода, также формируется команда на подачу инертного газа в пространство печи через осевое отверстие плазматрона. Контроллер формирует сигналы на соответствующие бесконтактные пускатели, реверсивного прямоходового механизма регулирующего клапана,

задавая определенную степень открытия клапана. Одновременно контролируется давление и температура на выходе системы водоохлаждения.

При формировании команды включения высоковольтного выключателя (ВВ) контроллер предварительно осуществляет следующую проверку:

- сводовая крышка опущена;
- подача охлаждающей плазматрон и подовый электрод воды произведена;
- подача аргона произведена.

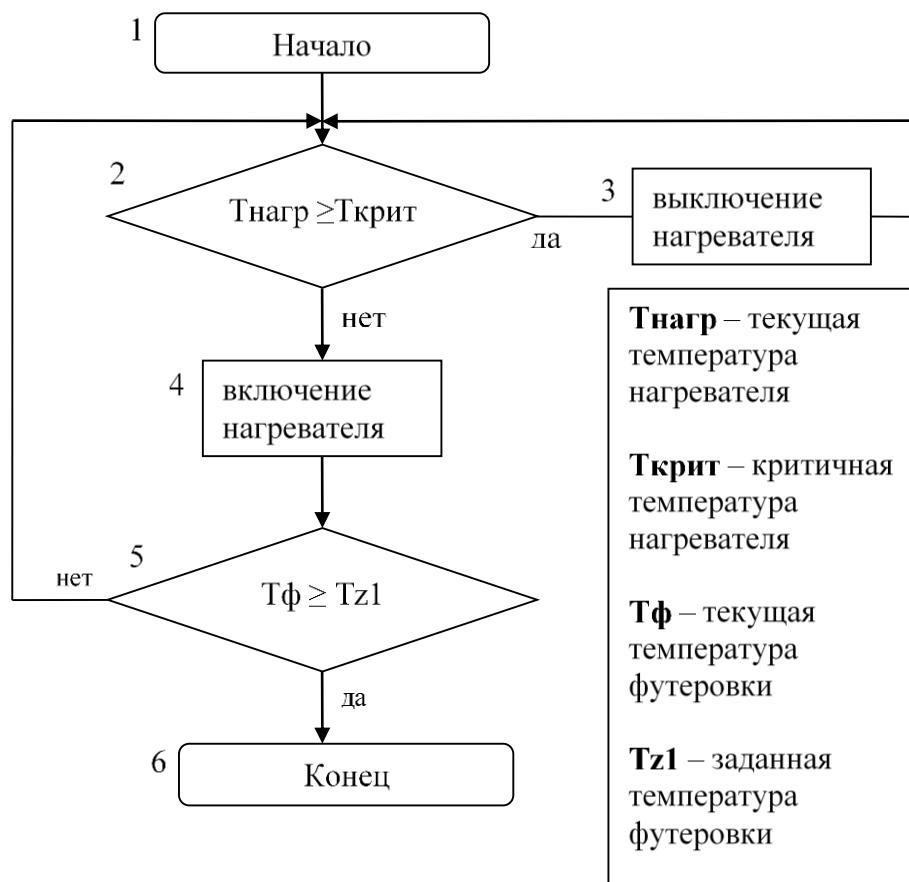


Рисунок 4.6 – Блок схема подпрограммы "Стадия 2"

Дальше идет команда на опускание сводового электрода. Электрод опускается до момента зажигания дуги в промежутке между плазматроном и шихтой. Момент зажигания дуги фиксируется по резкому падению напряжению и возрастанию тока в цепи плазматрона. Соответствующие сигналы поступают с измерительных трансформаторов тока и напряжения,

включенных в цепь питания плазматрона. Далее следует команда на поднятие плазматрона. Контролируя падение напряжения на дуге, плазматрон поднимается на требуемое расстояние, формируя дугу соответствующей для данного технологического процесса длины.

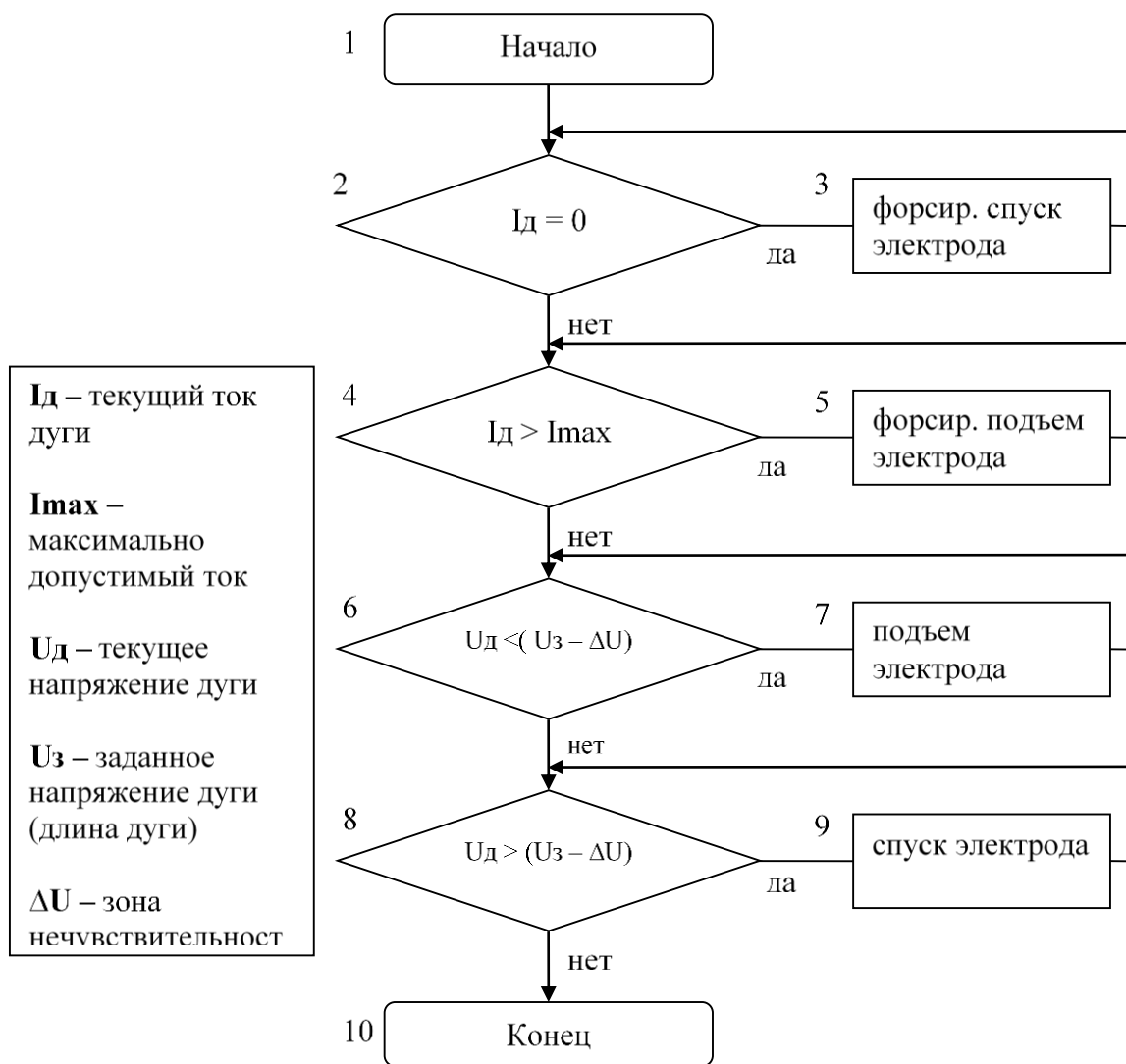


Рисунок 4.7 – Блок-схема подпрограммы "Стадия 3"

Управление движением электродов имеет 2 режима: автоматический и ручной, выбираемы на пульте управления АВТ/РУЧН

"АВТ" – режим при котором задание для движения электрода выдается программой регулятора в виде уставок модулю регулирования.

"РУЧН" – режим, при котором задание движения электрода на модуль перемещения задается с помощью соответствующих органов управления на пульте оператора.

В процессе автоматического управления осуществляется поддержание заданного оператором напряжения на дуге U_d перемещением электрода (изменением длины дуги). Если напряжение начинает расти до $U_d + \Delta U$ и держится в течение 5 с, то электрод опускают до восстановления прежнего значения U_d . Если напряжение снизится до $U_d - \Delta U$ и держится в течении 15 с, то электрод поднимают, если напряжение внезапно выросло до $U_{\text{дмакс}}$, то контроллер выдает сигнал на перемещение электрода вниз до величины U_d без учета временной задержки. При внезапном снижении напряжения до $U_{\text{дм}}$ (короткое замыкание на шихту) контроллер поднимает электрод без задержки [31].

Крайние положения электродов отслеживаются концевыми выключателями верхнего и нижнего положения и индуцируются на пульте управления.

Контроль температуры технической воды на выходе из системы охлаждения сводового и подового электродов осуществляется с помощью измерительных преобразователей. В случае превышения температуры контроллер корректирует расход воды и формирует управляющий сигнал регулируемому расход клапану с электрическим исполнителем механизма.

Определение агрегатного состояние расплавляемого материала осуществляется с помощью интеллектуальной системы распознавания образов (интеллектуальный датчик). Система включает в себя датчик, фиксирующий видеоизображение поверхности шихты и специализированное программное обеспечение. На основании непрерывного анализа интеллектуальный датчик выявляет момент перехода твердой шихты в расплавленное состояние и формирует сигнал "Металл расплавился" (выставляет флаг F_{raspl}). Контроллер при изменении состояния флага F_{raspl} начинает процесс отключения дугового нагрева.

Отключение осуществляется в следующей последовательности:

- отключение ВВ;
- отключение охлаждающей плазматрон и подовый электрод воды;
- поднятие электрода.

Дальнейшая доводка температуры металла до температуры разливки осуществляет с помощью нагревателей сопротивления. Работа контроллера на 4-й стадии аналогична работе на начальной стадии (этап 1) за исключением того, что обратная связь осуществляется по температуре расплава, а не по температуре футеровки.

Выпуск металла в миксер проводят при работающем регуляторе температуры, что предотвращает «зарастания» выпускного отверстия.

4.4 Выводы по главе 4

1. По результатам плавки выявлено, что расплавление слитков металла при подаче тока заданной величины происходит практически одновременно за счет того, что металл укладывается в пространство печи образуя теплотехнически «сплошное» тело.

2. За счет введения контура нагрева футеровки печи нагревателями сопротивления исключается образование колодца при плавке дугой постоянного тока, т.к. нет необходимости греть футеровку через металл при дуговом нагреве.

3. В основной алгоритм управления плавильным агрегатом добавлен программный модуль, осуществляющий контроль перехода переплавляемого материала в жидкое агрегатное состояние и вырабатывающий сигнал отключения контура нагрева дугой. Это позволяет исключить работу дуги на жидкий расплав.

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ

Для проверки адекватности разработанных алгоритмов проведены натурные испытания. Проведены ряд плавов на лабораторных печах. В процессе плавки проводится съемка поверхности загруженного переплавляемого материала. На основании полученных результатов делается вывод об эффективности предложенных алгоритмов. Съемка поверхности производилась в видимом спектре.

5.1 Используемое оборудование и методика эксперимента

В качестве материала для переплава использовались алюминиевые стержни (далее по тексту: алюминий). Для проведения плавов тигель с алюминием помещался в камеру муфельной печи *SNOL 6,7/1300*. Заявленная мощность печи 1300 Вт. Т.к. температура плавления алюминия составляет 660 °С, печь нагревали при закрытой дверце до 500 °С, затем открывали крышку и проводили съемку поверхности алюминия. На рисунке 5.1 представлена динамика нагрева печи при открытой дверце.

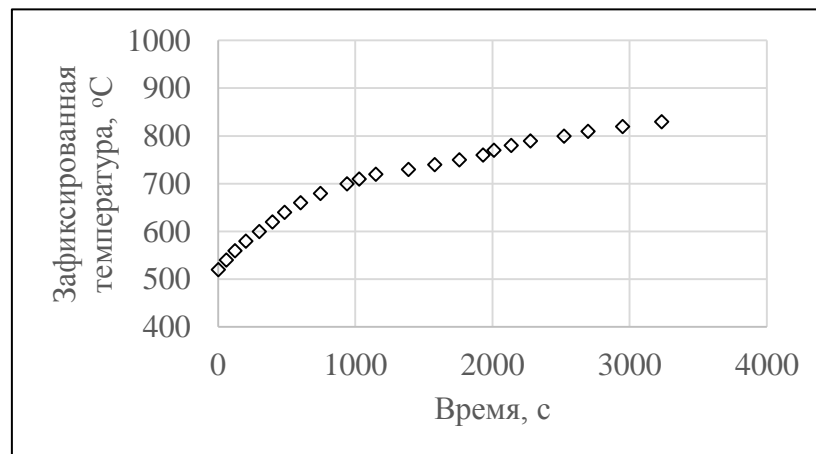


Рисунок 5.1 – Динамика разогрева печи после открытия дверцы камеры

Следует учитывать, что температура замерялась с помощью встроенной в печь термопары. Момент расплава алюминия в тигле фиксировался с помощью погружения тестового алюминиевого стержня в тигель.

В связи с тем, что фотографирование камеры печи при ее нагреве считается невозможным, реализована оптическая система, транслирующая изображение из камеры печи в сторону расположения устройства фиксации изображений. Оптическая система представляет собой штатив с закрепленным под углом относительно горизонта зеркалом. В систему заложены следующие степени свободы: регулировка по высоте, регулировка по горизонтали, регулировка угла наклона зеркала (рисунок 5.2).

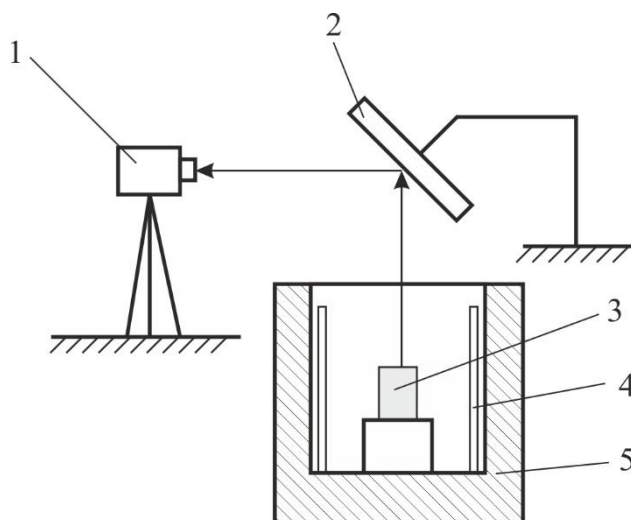


Рисунок 5.2 – Схема расположения оборудования

1 – устройство видеофиксации, 2 – зеркало, 3 – тигель с алюминием,
4 – нагревательные элементы печи, 5 – муфельная печь

Для фиксации фотоизображений использовалась фотокамера *Panasonic* с разрешением матрицы 2560 на 1920 точек. Фотокамера фиксировалась на штативе напротив зеркала.

В качестве второй печи для проведения плавки была использована индукционная печь УПИ-60-2. Расположение оборудования и разгонная характеристика указанной печи представлены на рисунках 5.3–5.5. Керамический тигель в ряде экспериментов помещался непосредственно в

камеру печи. При последующих экспериментах керамический тигель был заменен на графитовый.

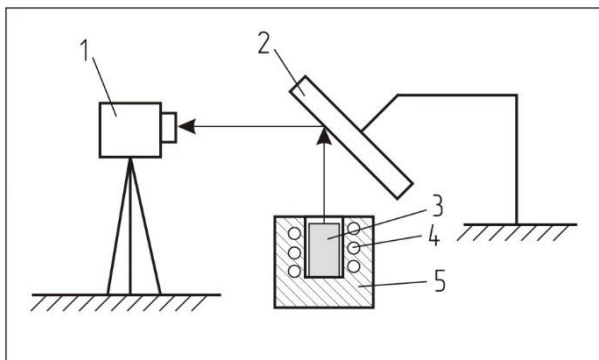


Рисунок 5.3 – Схема расположения оборудования

1 – устройство видеофиксации, 2 – зеркало, 3 – тигель с алюминием,
4 – индуктор, 5 – индукционная печь



Рисунок 5.4 – Схема расположения оборудования при проведении эксперимента

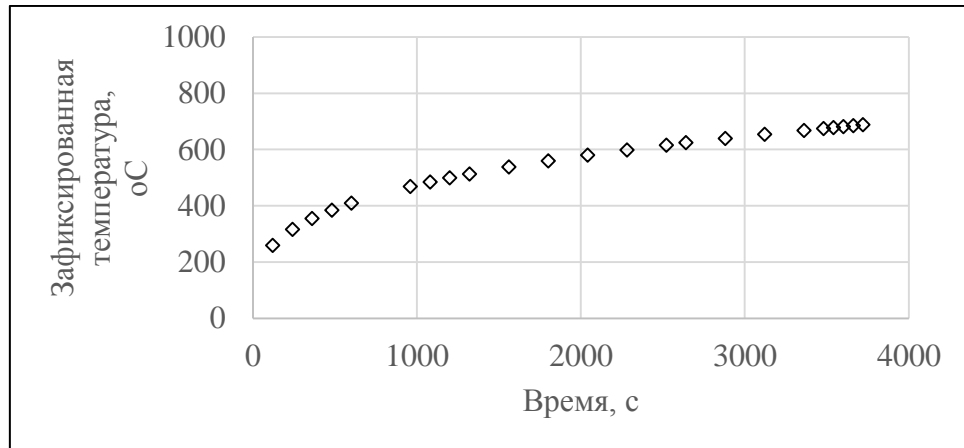


Рисунок 5.5 – Разгонная характеристика печи при плавке алюминия в керамическом тигле

Температура поверхности алюминия при его нагреве определялась контактным способом с помощью термопары соединенной с мультиметром. Активный спай термопары кратковременно помещался на материал на время необходимое для измерения.

При плавке в графитовом тигле термопара измеряла температуру поверхности тигля непрерывно (рисунок 5.6).

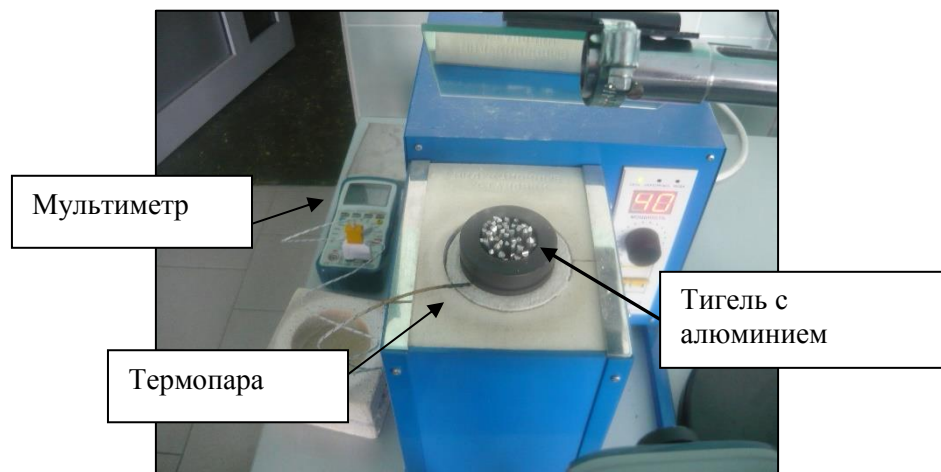


Рисунок 5.6 – Измерение температуры при плавке в графитовом тигле

Проведены натурные испытания по плавке алюминиевого сплава электрической дугой. Проводили нагрев фрагмента слитка АК12 с помощью дуги переменного тока. Величина тока дуги варьировалась от 70 до 250 А с

дискретностью 40 А. Выявлено, что при переменном токе 250 А начинается разбрызгивание металла в области дуги (рисунок 5.7). При этом видны клубы дыма через светофильтр, ощущается характерный запах.

При нагреве дугой постоянного тока (до 400 А) разбрызгивание не происходило, дыма не наблюдалось (рисунок 5.8). Свечение дуги более ровное без рывков.

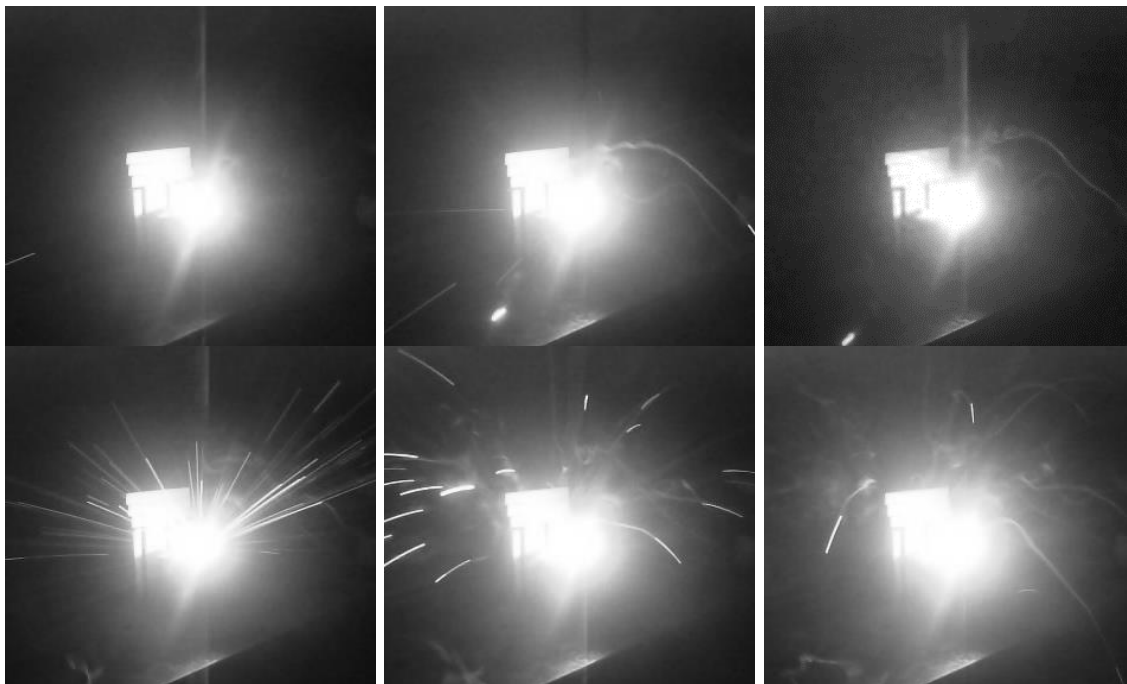


Рисунок 5.7 – Работа дуги переменного тока на слиток АК12



Рисунок 5.8 – Работа дуги постоянного тока на слиток АК12

При длительном воздействии на сплав дугой постоянного тока выделение дыма зафиксировано не было. Метод определения агрегатного состояния разрабатывается для печи комбинированного электронагрева, где

один из источников – дуга постоянного тока. Таким образом изображения, получаемые из рабочей камеры указанной печи, не будут искажены (затемнены). Эксперименты, реализованные в лабораторных печах, считаем адекватными реальным условиям расплавления в плавильном агрегате.

5.2 Оценка полученных взаимосвязей изображений с текущим агрегатным состоянием расплавляемого материала

Приведены результаты плавов в лабораторной печи. В плавках №№ 1–7 фиксация изображения проводилась в момент достижения температуры кратной 10 °С. При проведении плавов №№ 8–27 съемка проводилась непрерывно (записывался видеофайл), фиксировалось изображение в видимом спектре. Затем полученный видеофайл с помощью программы *Free Video to JPG Converter* разделялся на отдельные кадры с дискретностью 1 кадр в 1 секунду записанного процесса плавки. Полученный массив изображений подвергался математической обработке алгоритмами, рассматриваемыми в настоящей работе.

5.2.1 Плавка с температурной дискретизацией

Съемка производилась через зеркало. Для удобства съемки тигель крышкой не закрывался, соответственно были довольно большие потери тепла через верх. Были сняты фотоизображения, затем файлы были перенесены на компьютер. В качестве примера, приведен анализ лабораторной плавки № 7.

Анализ бинарных разностных изображений

Изображения представленные ниже получены путем вычитания двух последовательных кадров друг из друга.

Проведена бинаризация изображений, т.е. отделены интересующие нас области по некоторому порогу. Соответственно области с интенсивностью меньше пороговой считаем фоном. Видно, что в момент расплавления на

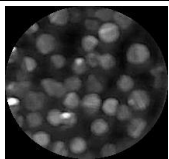

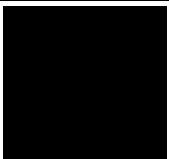

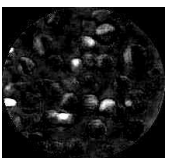

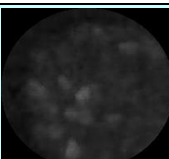
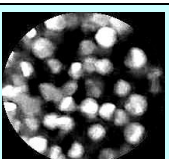
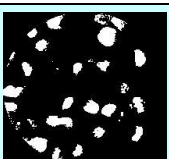
бинарном изображении появляются светлые области, соответствующие разнице двух состояний поверхности слитка в разные моменты времени. Процент белых изображений определяется следующим образом (представлен код *MATLAB* [95]):

```
N_all = sum( Im(:)>=0 ); %сумма всех точек изображения
N_wr = sum( Im(:)>0 ); %сумма точек с яркостью более 0
N_percent=(N_wr/N_all)*100;
```

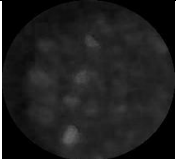
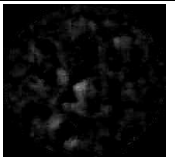
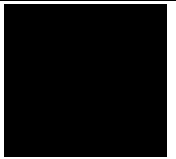
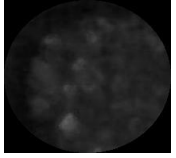
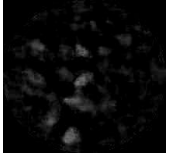
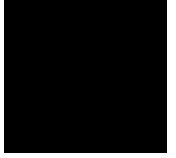
здесь *Im(:)* – все элементы массива, описывающего заданное изображение. Каждый элемент массива соответствует определенному пикселю изображения.

После обработки ряда изображений получены следующие результаты (таблицы 5.1). При изменении внешнего вида переплавляемого алюминия, при его плавлении, на разностном бинаризованном изображении появляются светлые области, площадь которых отлична от нуля. При полном расплавлении, когда алюминий перешел в жидкую фазу, области пропадают.

Таблица 5.1 – Обработка фотоизображений

№ кадра	T, °C	Изображение	Разностное изображение	Бинаризованное изображение	Доля белого фона, %	Количество связанных областей
206	590				0	0
208	600				0,87	10
210	610				11,33	64

Продолжение таблицы 5.1

№ кадра	T, °C	Изображение	Разностное изображение	Бинаризованное изображение	Доля белого фона, %	Количество связанных областей
212	620				0	0
214	630				0	0

Процесс расплавления хорошо прослеживается по графику (максимум белых областей) (рисунок 5.9).

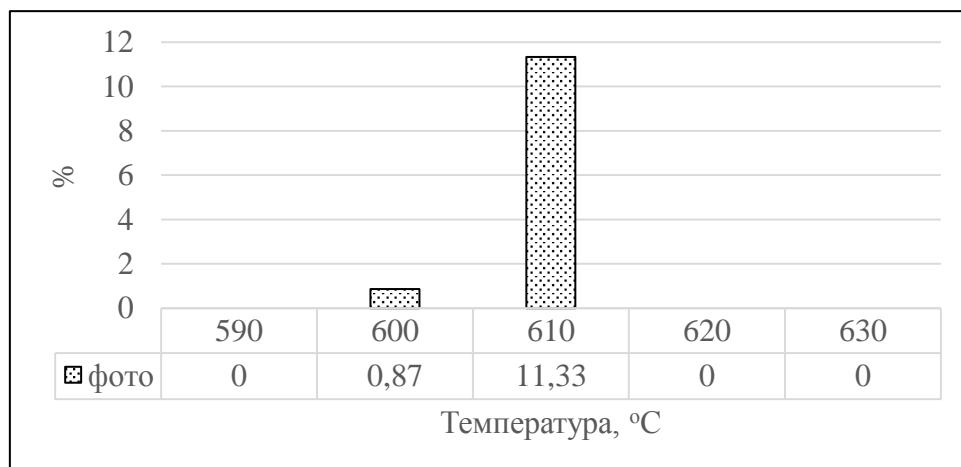


Рисунок 5.9 – Доля изменяющихся фрагментов изображении относительно общего количества пикселей изображения

Расчет площади

Рассмотрим поведение площади поверхности в процессе плавки.

В результате экспериментальной плавки было выявлено, что расплавление произошло при зафиксированной температуре 620 °C. Этот момент можно проследить и на графике (рисунок 5.10). Изменение масштаба до расплавления можно объяснить влиянием текущего освещения в момент

проведения плавки. После расплавления изображение ведет себя практически статично, что говорит об уменьшении темных полостей в процессе расплава.

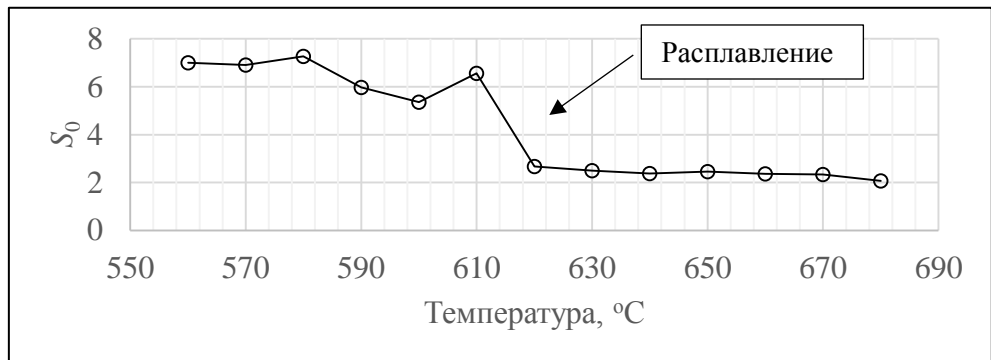


Рисунок 5.10 – Площадь поверхности исследуемого материала во время плавки (зеленый канал изображения)

Расчет фрактальной размерности

Как было отмечено в главе 2, для вычисления фрактальной размерности исходное изображение должно быть двумерным, т.е. содержать в себе пиксели двух значений 0 и 1. Проведем бинаризацию (приведение к двумерному виду) изображения тигля с металлическими стержнями (рисунок 5.11).

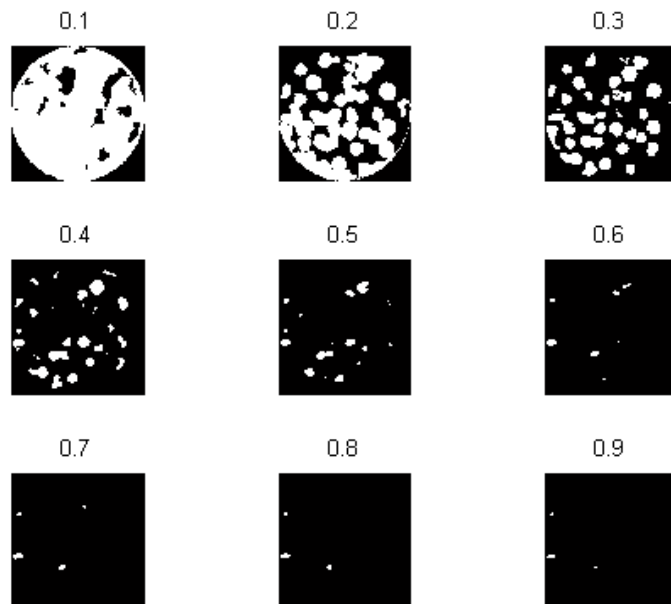


Рисунок 5.11 – Изображение тигля с алюминиевыми стержнями бинаризованное с различными порогами

Фрактальная размерность представленных изображений показана на рисунке 5.12.

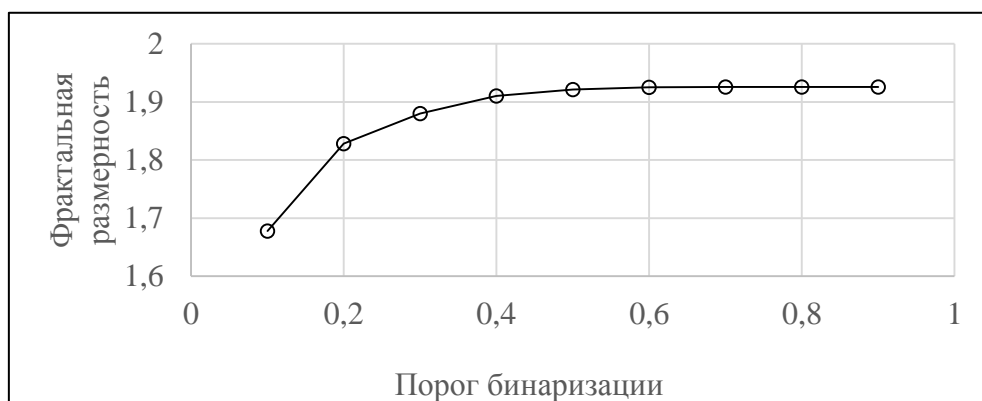


Рисунок 5.12 – Фрактальная размерность бинаризованных с различным порогом изображений

Проведем расчет фрактальной размерности для ряда изображений снятых последовательно при различной температуре. Данные расчета представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Фрактальная размерность

Температура	Порог бинаризации								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
560	1,68	1,83	1,88	1,91	1,92	1,93	1,93	1,93	1,93
570	1,69	1,84	1,89	1,91	1,92	1,93	1,93	1,93	1,93
580	1,69	1,83	1,88	1,91	1,92	1,92	1,93	1,93	1,93
590	1,70	1,83	1,88	1,91	1,92	1,92	1,93	1,93	1,93
600	1,72	1,84	1,89	1,92	1,92	1,93	1,93	1,93	1,93
610	1,62	1,80	1,87	1,91	1,92	1,92	1,93	1,93	1,93
620	1,60	1,69	1,83	1,90	1,92	1,92	1,93	1,93	1,93
630	1,60	1,63	1,74	1,85	1,91	1,92	1,92	1,93	1,93
640	1,60	1,70	1,74	1,84	1,91	1,92	1,92	1,93	1,93
650	1,60	1,70	1,76	1,90	1,92	1,92	1,93	1,93	1,93
660	1,61	1,71	1,76	1,87	1,91	1,92	1,93	1,93	1,93
670	1,60	1,70	1,75	1,82	1,91	1,92	1,93	1,93	1,93

При температуре 620 °С было зафиксировано расплавление металла. Зависимость прослеживается при порогах бинаризации ниже 0,5 (рисунок 5.13). Следует отметить, что исходное изображение нормализовано в диапазоне яркостей [0 1].

Из графика видно, что при расплавлении металла фрактальная размерность изменяется. Для данного типа материала (стержни) зависимость хорошо прослеживается при малых порогах бинаризации. Но определенности времени завершения расплавления не наблюдается.

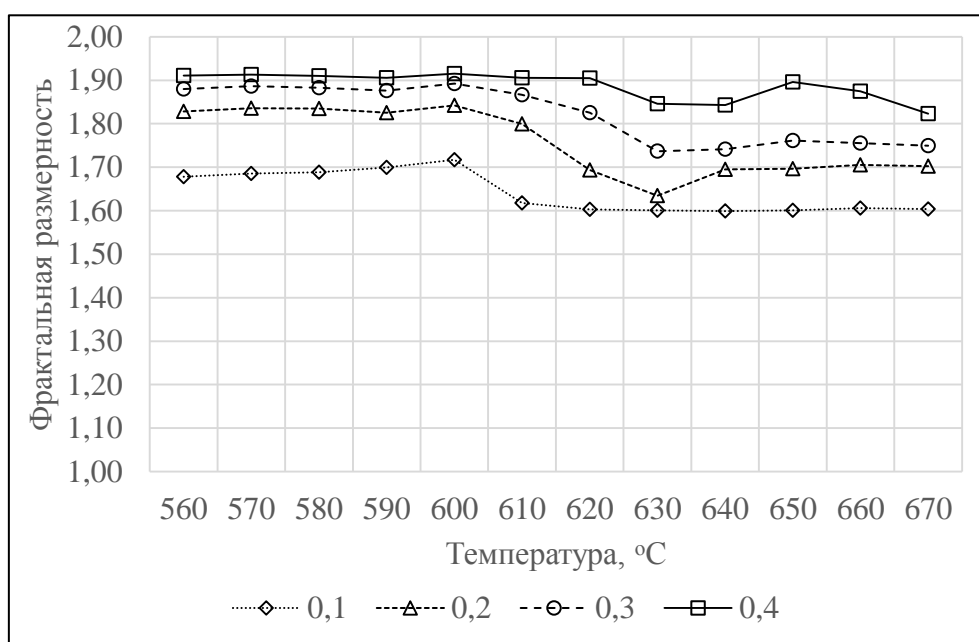


Рисунок 5.13 – Поведение фрактальной размерности в процессе плавки при различных порогах бинаризации исходного изображения

Для выбора порога бинаризации используем алгоритм вычисления порога бинаризации для полутонового изображения (метод Оцу) [60] и метод выбора порога по средней яркости для каждого изображения. Результаты вычисления фрактальной зависимости при выбранных порогах представлены на рисунках ниже (рисунки 5.14).

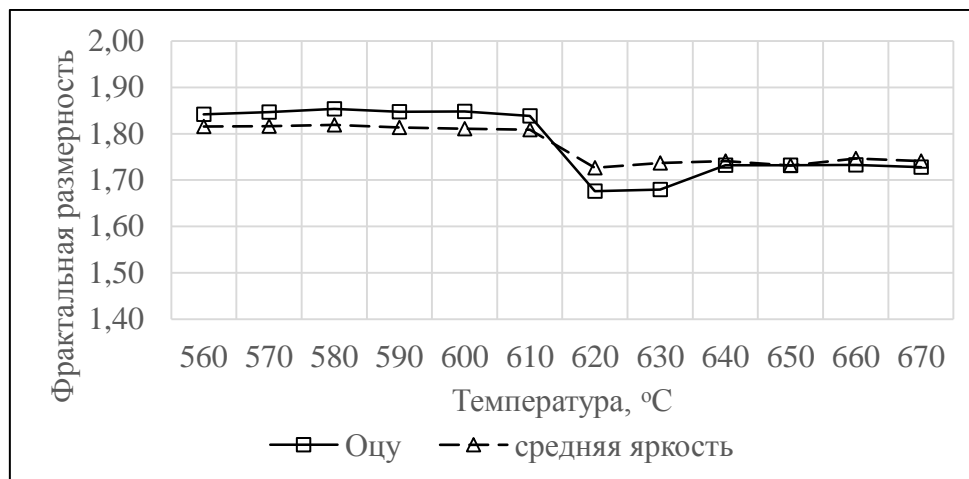


Рисунок 5.14 – Поведение фрактальной размерности в процессе плавки

В связи с тем, что отражение света от поверхности металла изменяется во время процесса плавки, то изменяется и фрактальная размерность фиксируемого изображения поверхности.

На графике явно прослеживается момент перехода металла в жидкое агрегатное состояния (температура 620 °C). При использовании метода Оцу падение значения фрактальной размерности при смене агрегатного состояния более существенно (8,7 % – падение при использовании метода Оцу, 4,4 % – использование средней яркости).

5.2.2 Плавки с временной дискретизацией

В качестве примера приведем результаты плавки № 25. Материал алюминиевые стержни прямоугольного сечения, уложенные в графитовый тигель (рисунок 5.15). При съемке процесса с помощью светильника, стоящего рядом с плавильной установкой, имитировалось направленное свечение.

Видео процесса плавки разделено на кадры с посекундной периодичностью. Кадры размером 512x512 пикселей.



Рисунок 5.15 – Алюминиевые стержни, уложенные в тигель

Анализ бинарных разностных изображений

Перед использованием разностного метода оценим уровень шумов на изображениях. Для этого проведем вычитание значений яркости на изображениях, зафиксированных в последовательные промежутки времени. На полученных разностных изображениях определим максимальное значение (наибольшее различие между изображениями). Результаты процедуры оценки различия изображений в течение плавки №25 приведен на рисунке 5.16.

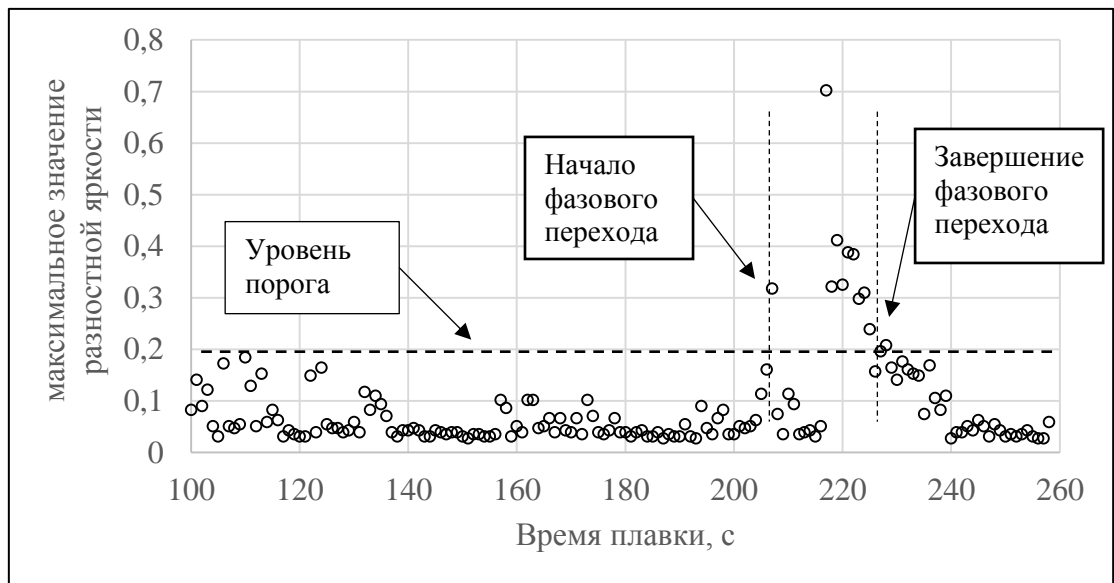


Рисунок 5.16 – Результаты вычисления максимальной яркостной разности между изображениями при плавке

В начальный период (время от 100 до 200 с от начала плавки) результаты не превышают некоторого значения (порог $threshold \in [0\ 1]$). В последующем периоде значения выше порога интерпретируются как области изменения поверхности в момент смены фазового состояния твердое-жидкое. Проводится бинаризация. Области изменения на бинаризованном изображении обозначаются белыми пикселями, остальные пиксели – черными.

Подсчет процента белых областей (областей различий) и анализ с помощью разработанного алгоритма, позволил определить, что расплавление

произошло в момент времени 227 с. В момент времени 226 с пропали области различия. Данные вычисления на рисунке 5.17.



а



б

Рисунок 5.17 – Результат обработки разностных изображений, полученных при проведении плавки № 25 (а) и увеличенный фрагмент периода плавки (б)

Расчет площади

Приведенная площадь изображения, вычисленная с использованием метода площадок, была определена для каждого кадра видео процесса плавки (рисунок 5.18). Темная кривая – значения площади, вычисленные по исходным изображениям плавки, светлая кривая – значения площади тех же изображений, но предварительно сглаженных с применением низкочастотного фильтра.

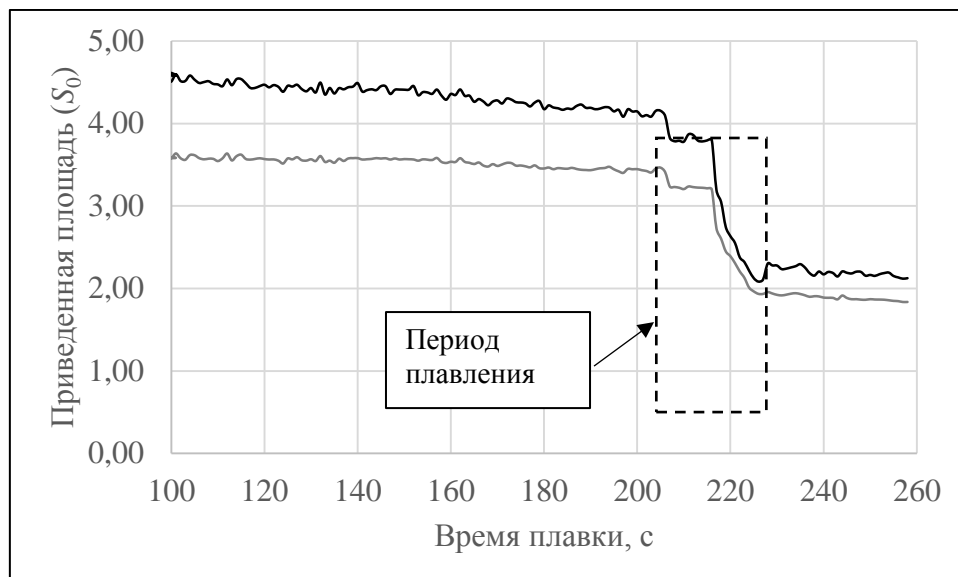


Рисунок 5.18 – Приведенная площадь поверхности при проведении плавки №12

Фильтрация позволила получить меньший разброс значений по окончанию плавки (начиная с 227 секунды плавки).

Проведем оценку изменения приведенной площади в каждый момент времени. Расчет проводим используя выражение:

$$S_{izm}(t) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{k=t}^{t+n} S_0(k) - \frac{1}{n} \sum_{m=t+1}^{t+n+1} S_0(m)}{\frac{1}{n} \sum_{k=t}^{t+n} S_0(k)},$$

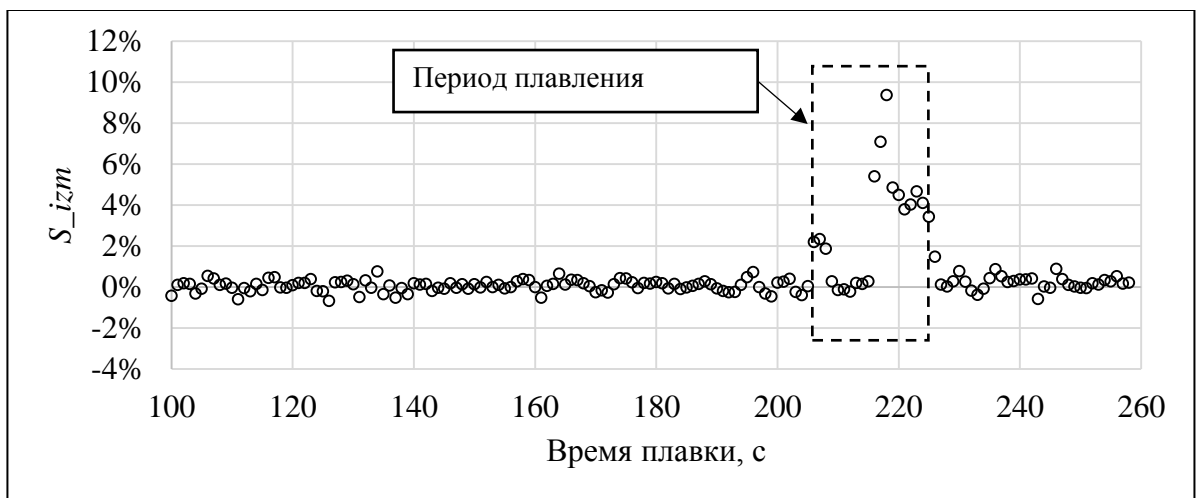
где $S_0(t)$ – значение приведенной площади,

n – количество точек кривой для сглаживания.

Результаты расчета при $n = 3$ представлены на рисунке 5.19.



а



б

Рисунок 5.19 – Изменение приведенной площади в процессе плавки
(а – исходные изображения, б – отфильтрованные изображения)

Видно, что изменение площади в промежутке времени от начала фиксации до момента расплавления для данной плавки изменяется в пределах от $-0,69\%$ до $0,74\%$ (отфильтрованные изображения). Отрицательные значения соответствуют увеличению приведенной площади, положительные значения – ее уменьшению. В момент начала переплава скорость изменения площади становится больше 2% и это является критерием для начала фиксации снижения заявленной площади (параметр *noise*) в процессе изменения фазового состояния алюминиевых слитков.

На графике (рисунок 5.23, б) можно заметить интервал резкого снижения площади, далее наступает стабилизация в некотором коридоре значений. Значение площади изменилось скачком с 4,09 единиц в момент начала перехода до 2,28 единиц в момент стабилизации, что составляет около 40%. С помощью разработанного алгоритма анализа площади определено, что расплавление произошло через 229 секунд после начала плавки.

Расчет фрактальной размерности

Поведение фрактальной размерности предложенных изображений, показано на рисунке 5.20. Прослеживается стабильность размерности до момента начала изменения формы слитков в процессе плавления. В последующий промежуток времени происходит подъем величины размерности, а затем резкое ее снижение. Изменения размерности происходило от величины 1,81 до 1,73 (4,4%).



Рисунок 5.20 – Фрактальная размерность поверхности при проведении плавки

Разработанный алгоритм анализа поведения фрактальной размерности при проведении плавки показал время расплавления на 225 секунде после начала плавки.

Определим критерий для начала фиксации изменения фрактальной размерности. Для этого, как и в случае приведенной площади используем аналогичный параметр изменения фрактальной размерности:

$$D_{izm}(t) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{k=t}^{t+n} D(k) - \frac{1}{n} \sum_{m=t+1}^{t+n+1} D(m)}{\frac{1}{n} \sum_{k=t}^{t+n} D(k)},$$

где $D(t)$ – значение фрактальной размерности,

n – количество точек для сглаживания.

Результат вычислений представлен на рисунке 5.21.

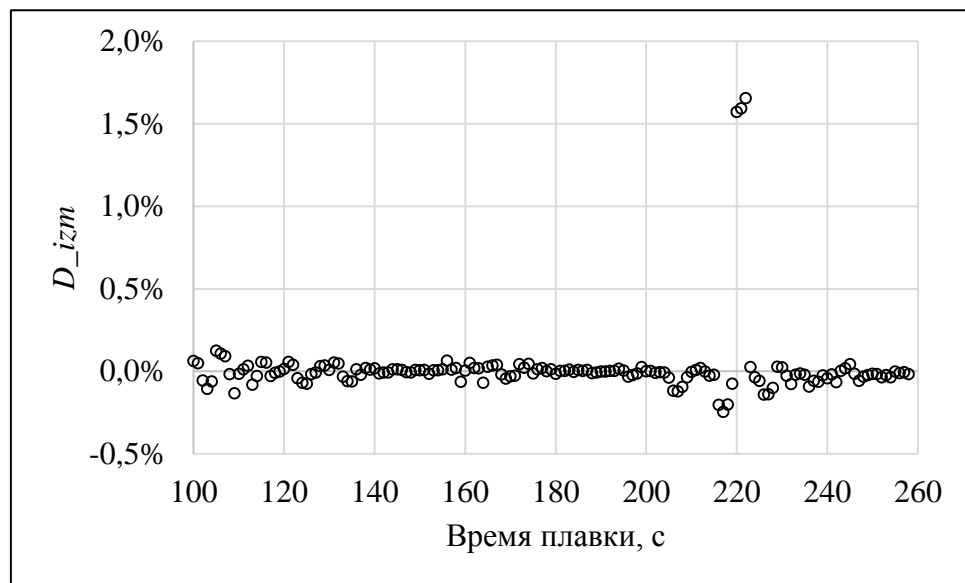


Рисунок 5.21 – Изменение фрактальной размерности в процессе плавки

Разброс значений для данной плавки составляет от $-0,13\%$ до $0,11\%$. Критерием начала фиксации снижения фрактальной размерности является уровень $D_{izm}(t)$ выше $0,2\%$.

5.2.3 Анализ полученных результатов

Результаты плавок №№1-7 представлены в таблицах 5.3–5.6. Курсивом выделены результаты с некорректно определенным временем расплавления (ошибка более, чем на 10 градусов).

Таблица 5.3 – Определение момента расплавления разностным методом

№ плавки	Зафиксированный момент окончания расплавления (t , °C)	
	Механический способ	Обработка изображений видимого спектра
1	630	640
2	630	630
3	620	<i>650</i>
4	610	620
5	630	<i>610</i>
6	610	620
7	620	620

Таблица 5.4 – Определение момента расплавления с применением метода расчета площади поверхности

№ плавки	Зафиксированный момент окончания расплавления (t , °C)	
	Механический способ	Обработка изображений видимого спектра ¹
1	630	630 (34%)
2	630	630 (41%)
3	620	620 (37%)
4	610	<i>620</i> (37%)
5	630	630 (44%)
6	610	<i>620</i> (33%)
7	620	630 (50%)

¹ В скобках приведен процент изменения площади в процессе смены агрегатного состояния

Таблица 5.5 – Определение момента расплавления с применением метода расчета фрактальной размерности

№ плавки	Зафиксированный момент окончания расплавления (t , °C)	
	Механический способ	Обработка изображений видимого спектра
1	630	640 (5%)
2	630	640 (8%)
3	620	630 (6%)
4	610	630 (6%)
5	630	630 (10%)
6	610	630 (6%)
7	620	630 (9%)

Таблица 5.6 – Результат плавов №№1-7 (температурная дискретизация)

№ измерения	Разностный метод	Метод вычисления площади	Метод расчета фрактальной размерности
1	о	о	о
2	о	о	х
3	х	о	о
4	о	х	х
5	х	о	о
6	о	х	о
7	о	о	о

Каждая ячейка таблицы соответствует одному проведенному анализу по указанному методу. Символом «о» выделены ячейки, в которых результат, полученный при работе метода в части определения момента полного расплавления, совпадает с результатом эксперимента. Символом «х» – ячейки с ошибочным результатом работы метода. Учитывались ошибки следующих типов:

- досрочное срабатывание;
- срабатывание с опозданием.

Досрочное срабатывание – результат работы метода, при котором сообщение о завершении плавления появлялось раньше, чем расплавление было определено физическим способом.

Срабатывание с опозданием – более позднее определение расплавления, с опозданием больше, чем на 5 секунд от реального завершения плавления.

Результаты плавов с временной дискретизацией представлены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Результат плавов №№8-27 (временная дискретизация)

№ измерения	Разностный метод	Метод вычисления площади	Метод расчета фрактальной размерности
8	о	о	о
9	о	о	о
10	о	о	х
11	о	х	х
12	о	о	о
13	х	о	о
14	х	о	о
15	о	о	о
16	о	о	х
17	о	о	х
18	о	о	х
19	о	о	о
20	о	о	х
21	о	о	о
22	х	о	о
23	о	х	о
24	о	о	х
25	о	о	х
26	х	о	о
27	х	о	о
доля срабатывания	0,75	0,9	0,6

Для определения критерия окончания периода плавки проанализируем значения приведенной площади в начале изменения агрегатного состояния и в конце это изменения. Значения приведены в таблице 5.8 и на рисунке 5.22 (результаты плавок, где окончание было определено ошибочно, выделены светлым).

Таблица 5.8 – Результаты определения параметров изменения приведенной площади

Номер плавки	Приведенная площадь		Изменение уровня приведенной площади, %
	Начало фиксации	Окончание фиксации	
8	6,11	3,7	39,44%
9	6,11	3,7	39,44%
10	6,21	3,82	38,49%
11	8,58	2,92	65,97%
12	6,00	2,64	56,00%
13	7,00	3,11	55,57%
14	4,80	2,69	43,96%
15	4,70	2,92	37,87%
16	5,70	3,2	43,86%
17	7,08	4,15	41,38%
18	7,82	4,82	38,36%
19	5,39	3,13	41,93%
20	7,48	2,74	63,37%
21	5,18	2,5	51,74%
22	6,48	4,25	34,41%
23	4,80	3,11	35,21%
24	5,55	3,49	37,12%
25	5,48	3,28	40,15%
26	4,90	2,85	41,84%
27	7,54	4,78	36,60%

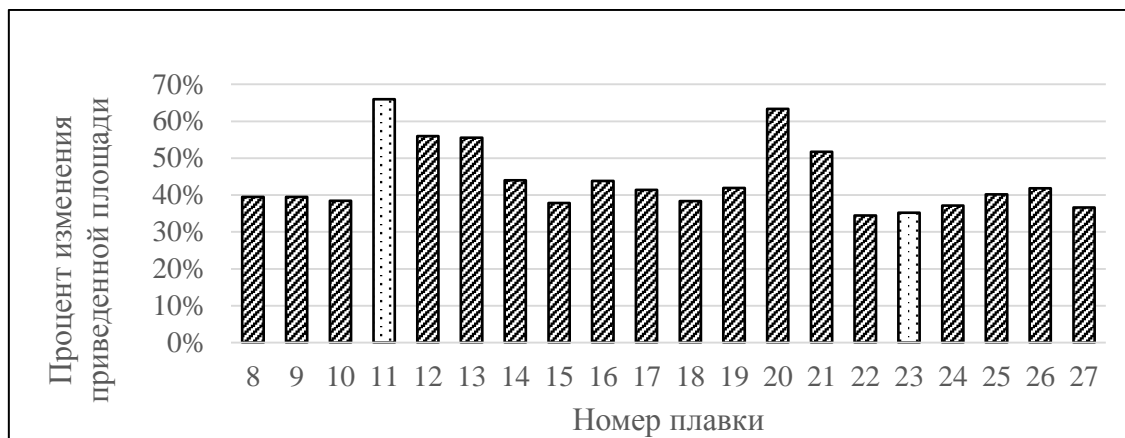


Рисунок 5.22 – Процент уменьшения приведенной площади в процессе изменения формы слитков при плавке

Таким образом, уменьшение приведенной площади на уровень не менее 30% показывает, что произошла фиксация промежутка перехода металла из твердого агрегатного состояния в жидкое.

Аналогично представим изменение значения фрактальной размерности (таблица 5.9 и рисунок 5.23).

Таблиц 5.9 – Результаты определения параметров изменения фрактальной размерности

Номер плавки	Фрактальная размерность		Изменение уровня фрактальной размерности, %
	Начало фиксации	Окончание фиксации	
8	1,73	1,65	4,62%
9	1,64	1,58	3,66%
10	—	—	—
11	1,62	1,56	3,70%
12	1,66	1,60	3,61%
13	1,76	1,62	7,95%
14	1,82	1,73	4,95%
15	1,76	1,62	7,95%
16	1,83	1,80	1,64%
17	1,77	1,75	1,13%

Продолжение таблицы 5.9

Номер плавки	Фрактальная размерность		Изменение уровня фрактальной размерности, %
	Начало фиксации	Окончание фиксации	
18	1,75	1,72	1,71%
19	1,68	1,61	4,17%
20	—	—	—
21	1,99	1,70	14,57%
22	1,74	1,67	4,02%
23	1,77	1,70	3,95%
24	1,50	1,45	3,33%
25	1,66	1,64	1,20%
26	1,83	1,71	6,56%
27	1,68	1,59	5,36%

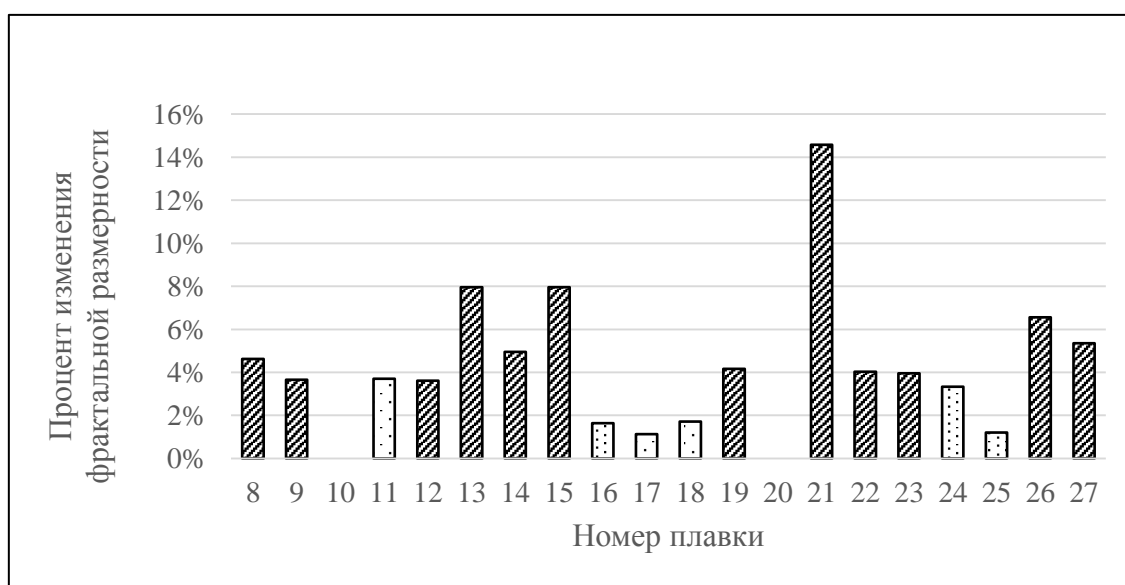


Рисунок 5.23 – Процент уменьшения фрактальной размерности в процессе изменения формы слитков при плавке

На рисунке выше отсутствуют результаты плавов, в которых не удалось выявить снижения фрактальной размерности, светлым выделено ошибочное определение окончания плавки.

Для достоверной интерпретации результатов необходимо, чтобы уровень снижения фрактальной размерности, в процессе перехода металла в жидкое агрегатное состояние, составлял не менее 3%.

Результаты работы прошли успешную апробацию и внедрение на предприятии АО «Специальное конструкторско-технологическое бюро по электрохимии с опытным заводом» (АО «СКТБЭ»), г. Москва. Продолжительность технологического процесса плавки металла была сокращена на 5%.

Научные исследования в направлении анализа изображения поверхности переплавляемого металла позволяют совершенствовать алгоритмы автоматизации неразрушающего метода контроля, в том числе с применением информационных технологий.

5.3 Выводы по главе 5

1. Проверена адекватность предложенных методов определения агрегатного состояния в процессе плавки. Показано, что с помощью разностного метода и метода определения фрактальной размерности можно определить окончание переплава.

2. Критерием фазового перехода является изменение площади отраженной поверхности не менее, чем на 30% от начального состояния с дальнейшей ее стабилизацией в пределах $\pm 2\%$.

3. В результате проведения экспериментальных плавок было выявлено, что наиболее эффективным методом определения момента расплавления является метод измерения площади поверхности (достоверность определения 90%). Для повышения надежности до 99-100% указанный метод необходимо использовать совместно с другими рассматриваемыми методами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ЛИЧНО АВТОРОМ

1. Разработаны и обоснованы методы определения времени перехода слитков алюминиевого сплава из твердого состояния в жидкое, основанные на определении неровности поверхности слитков, расположенных в пространстве печи.

2. Предложено средство (система технического зрения) и алгоритмическое обеспечение для реализации разработанного метода контроля, исследованы его характеристики.

3. Предложен алгоритм работы плавильной печи, включающий в себя подпрограмму определения агрегатного состояния, вырабатывающую управляющее воздействие на контур управления дуговым нагревом. Работа подпрограммы основывается на реализации, предложенных исследованных методов.

4. Экспериментально доказано, что рассчитываемая площадь поверхности переплавляемого металла, достигшего расплавленного состояния изменяется на величину не менее 30% от первоначального состояния (до начала плавки).

5. Показана эффективность использования фрактальной размерности для получения количественного критерия оценки смены агрегатного состояния переплавляемого металла.

6. Разработанные способы контроля смены агрегатного состояния расплавляемого металла позволили осуществить оперативное отключение дугового нагрева, исключая тем самым работу дуги на жидкий расплав, испарение его и возможность прохождения реакции карбидообразования в газовой фазе.

7. Проведенные научные исследования в направлении анализа изображения поверхности переплавляемого металла позволяют совершенствовать алгоритмы автоматизации неразрушающего метода контроля и исследования изменения формы различных поверхностей, в том числе, с применением информационных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Русал об итогах работы и мировом рынке алюминия в 2016 году [электронный ресурс] // *Infogeo.ru*: Крупнейшая база данных по рынку металлов в открытом доступе. – Режим доступа: <http://www.infogeo.ru/metalls/press/?act=show&rev=5309> (Дата обращения 1.06.2017).
2. Малых, С.В. Рыночная оценка инновационного процесса в литейном производстве [Текст] / С.В. Малых. – Одесса: ТЕС, 2004. – 110 с.
3. Особенности литья алюминия под давлением [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://promzn.ru/metallurgiya/lite-alyuminiya-pod-davleniem.html>. (Дата обращения 15.04.2016).
4. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Д44. Справочник в 3 т.: Т. 1 / под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – С. 992.
5. Зыскин, В.А. Выплавка алюминиевых сплавов в дуговых печах постоянного тока нового поколения [Текст] / В.А. Зыскин, С.И. Поздняков, В.С. Малиновский // *Технология легких сплавов*. – 2006. – №1-2. – С. 152-156.
6. Мондольфо, Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов [Текст] / Пер. с англ. под ред. Ф.И. Квасова [и др.] – М.: Металлургия, 1979. – 639 с.
7. Технологические особенности плавки цветных металлов и сплавов в электропечах [электронный ресурс]. – Режим доступа: http://markmet.ru/tehnologiya_metallov/tekhnologicheskie-osobennosti-plavki-tsvetnykh-metallov-i-splavov-v-elektropech (Дата обращения 15.04.2016).
8. Устройство автоматического определения момента расплавления шихты в дуговой электропечи [Текст] : пат. 870446 СССР : МПК С21С5/52 С.М. Ковриго, Б.Б. Анисимов, В.М. Артынский, Н.И. Денисов; заявитель и

патентообладатель Киевский институт автоматики им. XXV съезда КПСС. – №2868906/22-02 ; заявл. 14.01.1980 ; опубл. 07.10.1981, Бюл. № 37. – 7 с.

9. Способ определения момента расплавления шихты в дуговой электропечи [Текст] : пат. 865926 СССР : МПК C21C5/52 / С.М. Ковриго, Б.Б. Анисимов, В.М. Артынский, Н.И. Денисов; заявитель и патентообладатель Киевский институт автоматики им. XXV съезда КПСС. – №2895668/22-2 ; заявл. 14.01.80 ; опубл. 23.09.1981 Бюл. № 35. – 2 с.

10. Способ определения момента расплавления шихты [Текст] : пат. 440414 СССР: МПК C21C5/52 / Э.М. Григорьев, О.М. Сосонкин, В.А. Кудрин, Л.Е. Никольский [и др.] ; заявитель и патентообладатель Московский вечерний металлургический институт, Красноярский завод "СИБЭЛЕКТРОСТАЛЬ", Всесоюзный научно-исследовательский институт автоматизации черной металлургии. – № 1939810/22-2 ; заявл. 02.07.73; опубл. 25.08.74, Бюл. №37. – 2 с.

11. Способ контроля температуры расплава в индукционной тигельной печи [Текст] : пат. 1772563 Рос. Федерация : МПК F27B14/20, F27D19/00 / Ю.О. Сургучев, С.С. Политковский; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт систем автоматизации и управления. – №4908904; заявл. 06.02.1991; опубл. 30.10.1992. – 4 с.

12. Капля, Е. В. Моделирование процессов управления в интеллектуальных измерительных системах [Текст] / Е.В. Капля, В.С. Кузенанов, В.П. Шевчук. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 512 с.

13. Электрооборудование и автоматика электротермических установок: Справочник [Текст] / А.П. Альтгаузен, И.М. Бертицкий, М.Д. Бершицкий [и др.] ; Под ред. А.П. Альтгаузена, М.Д. Бершицкого, М.Я. Смелянского, В.М. Эдемского. М.: Энергия, 1978. – 304 с.

14. Электротехнологические установки [Текст] : конспект лекций / сост. Г.Н. Ополева. – Иркутск: ИрГУПС, 2010. – 74 с.

15. Правила устройства электроустановок [Текст] : Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 февраля 2015 г. – М.: КНОРУС, 2015. – 488 с.

16. Болотов, А.В. Электротехнологические установки [Текст] : учебник для вузов / А.В. Болотов, Г.А.Шепель. – М.: Высшая школа, 1988. – 336 с.

17. Шеховцов, В.П. Электрическое и электромеханическое оборудование [Текст] : Учебник / В.П. Шеховцов. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2004. – 407 с.

18. Электротехнологические промышленные установки [Текст] : учебник для вузов / И.П. Евтюкова, Л.С. Кацевич, Н.М. Некрасова [и др.]; под ред. А. Д. Свенчанского. – М.: Энергоиздат, 1982. – 400 с.

19. Минеев, А.Р. Моделирование электротехнологических процессов и установок [Текст] / А.Р.Минеев, А.И. Коробов, М.Я. Погребисский. – М.: «Компания Спутник+», 2004. – 124 с.

20. Кручинин, А.М., Рубцов В.П. Датчики и исполнительные элементы [Текст] : учебное пособие по курсу «Элементы систем автоматизации электропечей» / А.М. Кручинин, В.П. Рубцов. – М.: Издательство МЭИ, 1983. – 74 с.

21. Рубцов, В.П. Исполнительные элементы систем автоматического управления электротехнологическими установками [Текст] : учебное пособие по курсу «Автоматическое управление электротехнологическими установками» / В.П. Рубцов. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 56 с.

22. Сокунов, Б.А. Электротермические установки [Текст] : учебное пособие / Б.А. Сокунов, Л.С. Грובה. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 122 с.

23. Автоматическое управление электротермическими установками [Текст] : учебник для вузов / А.М. Кручинин, К.М. Махмудов, Ю.М. Миронов [и др.] ; под ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.

24. Свенчанский, А. Д. Электрические промышленные печи. В 2 ч. Ч. 1. Электрические печи сопротивления: Учебник для вузов по специальности

«Электротермические установки» [Текст] / А. Д. Свенчанский. – Изд. 2-е, перераб. – М., 1975. – 384 с.

25. Электроды сопротивления отражательного типа [электронный ресурс] : Сборник технических статей *Teh-lib.ru*. – Режим доступа: <http://www.teh-lib.ru/tpip/electropechi-soprotivleniya-otrazhatelnogo-tipa.html>. (Дата обращения 10.02.2017).

26. Андреев, А.Д. Высокопроизводительная плавка алюминиевых сплавов [Текст] / А.Д. Андреев, В.Б. Гогин, Г.С. Макаров. – М.: Металлургия, 1980. – 136 с.

27. Лапшин, И.В. Автоматизация дуговых печей [Текст] / И.В. Лапшин. – М.: МГУ, 2004. – 165 с.

28. Технологические особенности плавки цветных металлов и сплавов в электропечах [электронный ресурс]. – Режим доступа: http://markmet.ru/tehnologiya_metallov/tekhnologicheskie-osobennosti-plavki-tsvetnykh-metallov-i-splavov-v-elektropech. (Дата обращения 10.02.2017).

29. Егоров, С.Г. Практическая реализация методов внешнего воздействия на металлические расплавы [Текст] : монография/ С. Г. Егоров, И.Ф. Червонный, Р.П. Воляр ; Запорожская государственная инженерная академия. – Запорожье: ЗГИА, 2012. – 220 с.

30. Газы и окислы в алюминиевых деформируемых сплавах [Текст] / В.И. Добаткин, Р.М. Габидулин, Б.А. Колачев [и др.]. – М.: Металлургия, 1976. – 264 с.

31. Вагин, Г.Я. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике [Текст] / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, А.А. Севостьянов. – Н.Новгород: НГТУ, 2004. – 214 с.

32. Миронов, Ю.М. Электрооборудование и электроснабжение электротермических, плазменных и лучевых установок [Текст] : учебное пособие для вузов / Ю.М. Миронов, А.Н. Миронова – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 376 с.

33. Фарнасов, Г.А. Электротехника, электроника, электрооборудование [Текст] : учебник для вузов / Г.А. Фарнасов. – М.: "ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ", 2000. – 392 с.

34. Источник питания дуговой печи постоянного тока [Текст] : пат. RU 2216883 МПК H05B7/144, H02M7/162 / С.М. Нехамин, Г.А. Фарнасов, А.К. Филиппов [и др.] ; заявители и патентообладатели С.М. Нехамин, Г.А. Фарнасов, А.К. Филиппов. – №2001131516/09 ; заявл. 23.11.2001 ; опубл. 20.11.2003, Бюл. № 32.

35. Нехамин, И.С. Разработка системы управления дуговой печью постоянного тока: диссертация на соис. учен. степ. кандидата технических наук: 05.09.10 [Текст] / Нехамин Илья Сергеевич; [Место защиты: Моск. энергет. ин-т]. – Москва, 2009. – 128 с.

36. Автоматизация металлургических печей [Текст] / В.Ю. Каганов, О.М. Блинов, Г.М. Глинков, В.А. Морозов. – М.: «Металлургия», 1975. – 376 с.

37. Малиновский, В.С. Плавка алюминиевых сплавов в дуговых печах постоянного тока. Статус и перспектива новой технологии [Текст] / В.С. Малиновский, В.Д. Малиновский, М. А. Мешков, Л. В. Ярных // Металлургия машиностроения. – 2004. – №4. – С. 2-7

38. Мешков, М.А. Исследование процесса плавки алюминиевых сплавов дугой постоянного тока / М.А. Мешков // Технология легких сплавов. – 2002. – №2. – С. 20-26.

39. Малиновский, В.С. Дуговые печи постоянного тока нового поколения / В.С. Малиновский, Л.В. Ярных // Металлургия машиностроения. – 2001. – №1. – С. 2-13.

40. Малиновский, В.С. Опыт промышленной эксплуатации дуговой печи постоянного тока для плавки алюминиевых сплавов [Текст] / В.С. Малиновский, Л. В. Брежнев, С. А. Гаевский, А. С. Крюков // Литейное производство. – 2001. – № 5.

41. Малиновский, В.С. Универсальные дуговые печи постоянного тока нового поколения для литейного и металлургического производств [Текст] /

В.С. Малиновский, В.Д. Малиновский, И.Б. Власова // Литейное производство. – 2005. – № 7. – С. 15-19

42. Фарнасов, Г.А. Способ переплава слитков алюминиевых сплавов в печи с комбинированным электронагревом [Текст] / Г.А. Фарнасов, М.В. Колистратов, Р.В. Гребенщиков // Электрометаллургия. – 2011. – №3. – С. 8-13

43. Руководство по бесконтактному измерению температуры https://testoshop.ru/download/rukovodstvo_po_ik_izmereniyam.pdf дата обращения 25.01.2018

44. Галанов, Е. К. Метрологические вопросы измерения температуры поверхностей бесконтактным методом инфракрасной пирометрии [Текст] / Е.К. Галанов, М.К. Филатов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2008. – №3. – С. 195-203

45. Андреев, С.Ю. Экспериментальная оценка доверительных границ измерений температуры пирометрами [Текст] / С. Ю. Андреев, И. П. Федоров // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – №9 (103). – С. 24-33

46. Русин, С.П. Об определении истинной температуры непрозрачных нагретых тел по спектру теплового излучения: поиск простых зависимостей излучательной способности от длины волны [Текст] / С.П. Русин // ТЕМПЕРАТУРА – 2011. 4-я Всероссийская и стран-участниц КООМЕТ конференция по проблемам термометрии. Тезисы. 19-21 апреля 2011 года. Санкт-Петербург, Россия – 2011. – С. 27-28

47. Фрунзе, А.В. Об одной малоизвестной особенности пирометров спектрального отношения [Текст] / А.В. Фрунзе // Фотоника. – 2013. – №3. – С. 86-94

48. Будадин, О.Н. Тепловой неразрушающий контроль изделий [Текст] / О.Н. Будадин, А.И. Потапов, В.И. Колганов, Т.Е. Троицкий-Марков, Е.В. Абрамова. – М.: Наука, 2002. – 472 с.

49. Инженерные основы теплового контроля. Опыт промышленного применения : монография [Текст] / З.Г. Салихов, О.Н. Будадин, Е.Н. Ишметьев, др. . – М.: Изд-во МИСиС, 2008. – 475 с.

50. Способ бесконтактного измерения температуры поверхности нагретых тел [Текст] : пат. 2238529 МПК G01J 5/60 (2000.01) / В.А. Тюрин, П.Л. Алексеев; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный институт стали и сплавов" (технологический университет). – 2003111865/28 ; заявл. 24.04.2003 ; опубл. 20.10.2004, Бюл. №29. – 4 с.

51. Лазерные сканеры *FARO* [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.faro.com.ru> (Дата обращения 21.02.2018).

52. Кошан, Е.К. Возможности, преимущества и недостатки наземного лазерного сканирования [Текст] / Ерасыл Кошанулы Кошан // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – №1. – С. 27-30

53. Андреев, А. Д. Высокопроизводительная плавка алюминиевых сплавов [Текст] / А.Д. Андреев, В.Б. Гогин, Г.С. Макаров. – М.: Металлургия, 1980. – 136 с.

54. Материал *Al* (Алюминий). Алюминиевые покрытия [электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.elektrosteklo.ru/Al_rus.htm. (Дата обращения 24.05.2016).

55. Критерии и методы укрупнённой оценки качества изображений в растровых графических форматах [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aiportal.ru/articles/other/evaluation-of-image-quality.html>. (Дата обращения 20.06.2017).

56. ГОСТ 27459-87 Системы обработки информации. Машинная графика. Термины и определения [текст] / Информационная технология. Термины и определения: Сб. ГОСТов. – М.: Стандартинформ, 2005 год. – с. 37-46.

57. Новейшие методы обработки изображений [Текст] / ред. А.А. Потапова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.

58. Способ определения площади рельефа [Текст] : пат.RU 2253089 МПК G01 C11/00 / В.Ф. Давыдов, А.В. Корольков, О.К. Чернобровина, Т.Н. Шимон ; патентообладатель Московский государственный университет леса. – №2004104776/28 ; заявл. 19.02.2004 ; опубл. 27.05.2005, Бюл. №15. – 11 с.

59. Прэтт, Уильям Цифровая обработка изображений: В 2-х кн. [Текст] / Уильям Прэтт ; Пер. с англ. под ред. Д. С. Лебедева – М.: Мир, 1982. – Кн.2. – 790 с.

60. Розенфельд, Азриэль Распознавание и обработка изображений с помощью вычислительных машин [Текст] / А. Розенфельд; Пер. с англ. И. Б. Гуревича [и др.] ; Под ред. канд. техн. наук Д. С. Лебедева. – М.: Мир, 1972. – 230 с.

61. Евтихийев, Н.Н. Увеличение отношения сигнал/шум за счёт пространственного усреднения при регистрации изображений [Текст] / Н.Н. Евтихийев, В.В.Краснов, В.Г.Родин [и др.] // Вестник РУДН. Серия: Математика, информатика, физика. – 2012. – №4. – С.122-136

62. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление [Текст] / Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, О.Е. Балашов, А.И. Степашкин. – М.: Радиотехника, 2008. – 176 с.

63. Прэтт, Уильям Цифровая обработка изображений [Текст] : В 2-х кн. / Уильям Прэтт. – М.: Мир, 1982. – Кн.1. – 310 с.

64. Соловьев, Н.В. Улучшение качества растровых изображений: Учеб. пособие [Текст] / Н.В. Соловьев, А.М. Сергеев. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. – 158 с.

65. Колистратов, М.В. Контроль фазового перехода металл-расплав [Текст] / М.В. Колистратов, Ю.А. Белобокова // Новые информационные технологии в автоматизированных системах: материалы двадцать первого научно-практического семинара. – М.:ИПМ им. М.В. Келдыша, 2018. – 432 с. С. 46-50

66. Шкундин, С.З. Проверка работоспособности алгоритмов определения изменения агрегатного состояния металла [Текст] / С.З. Шкундин, М.В. Колистратов, Ю.А. Белобокова // Системный администратор. – 2018. – №10. – С. 90-93

67. Кроновер, Ричард М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории [Текст] : Учеб. пособие / Ричард М. Кроновер ; Пер. с англ. Т.Э. Кренкеля и А.Л. Соловейчика под ред. Т.Э. Кренкеля. – М.: Постмаркет, 2000. – 350 с.

68. Петухов, Н.Ю. Распознавание текстурных изображений на основе статистических и фрактальных признаков [Текст] / Н.Ю. Петухов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2011. – №4. – С.63-68

69. Федер, Е. Фракталы [Текст] / Е. Федер; Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 254 с.

70. Морозов, А.Д. Введение в теорию фракталов [Текст] / А.Д. Морозов. – М.: Институт компьютерных исследований. – 2002. – 160 с. 58. Сойфер, В.А. Компьютерная обработка изображений. Часть 2. Методы и алгоритмы [Текст] / В.А.Сойфер // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – №3. – С. 110-121

71. Otsu, N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms [Text] // IEEE Transactions on systems, MAN, and CYBERNETICS. January 1979. Vol. SMC-9, № 1. P. 62-66.

72. Шкундин, С.З. Методы оценки момента расплавления металла при плавке [Текст] / С.З. Шкундин, М.В. Колистратов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – Деп. рук., 50 с. – Справка №1106/1117 от 14.09.2017

73. Агеева, А. И. Сравнительный анализ моделей *СМΥΚ* и *RGB* при поканальном выводе полноцветных изображений [Текст] / А.И.Агеева, Н.С. Кренинина, С.И. Ходов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2011. – №6-2. – С. 386-391

74. Фисенко, В.Т. Компьютерная обработка и распознавание изображений [Текст] : учеб. пособие / В.Т. Фисенко, Т.Ю. Фисенко – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 192 с.

75. Визильтер, Ю.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения [Текст] : Курс лекций и практических занятий / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов, А.В. Бондаренко [и др.] – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.

76. Системы технического зрения [Текст] : Справочник / В.И. Сырякин, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенков [и др.] ; Под ред. Сырякина В.И., Титова В.С. – Томск: МГП «РАСКО» при изд. «Радио и связь», 1992. – 367 с.

77. Васильева, Н.С. Анализ изображений и видео. Лекция 4: Построение признаков и сравнение изображений: глобальные признаки. / Н.С. Васильева. – Санкт-Петербург. *ComputerScienceCenter*, 12 октября 2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.lektorium.tv/lecture/14001>. (Дата обращения 25.10.2017).

78. Бутаков, Е.А. Обработка изображений на ЭВМ [Текст] / Е.А. Бутаков, В. И. Островский, И. Л. Фадеев. – М.: Радио и связь, 1987. – 240 с.

79. Неизвестный, С. И. Приборы с зарядовой связью. Устройство и основные принципы работы [Электронный ресурс] / С.И. Неизвестный, О.Ю. Никулин // Специальная Техника. – 1999. – №4. – Режим доступа: http://www.ess.ru/sites/default/files/files/articles/1999/04/1999_04_05.pdf. (Дата обращения 25.10.2017).

80. Неизвестный С. И., Никулин О. Ю. Приборы с зарядовой связью – основа современной телевизионной техники. Основные характеристики ПЗС. [Электронный ресурс] / С.И. Неизвестный, О.Ю. Никулин // Специальная Техника. – 1999. – №5. – Режим доступа:

http://www.ess.ru/sites/default/files/files/articles/1999/05/1999_05_04.pdf.

(Дата обращения 25.10.2017).

81. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений [Текст] / Гонсалес Р., Вудс Р. ; пер. с англ. Л.И. Рубанова, П.А. Чочиа. – М: Техносфера, 2005. – 1072 с.

82. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде *MATLAB* [Текст] / Р. Гонсалес, В. Вудс, С. Эддинс; пер. с англ. В.В. Чепыжова. – М.: Техносфера, 2006. – 512 с.

83. Головастов, А. Машинное зрение и цифровая обработка изображений [Текст] / А. Головастов // Современные технологии автоматизации. – 2010. – №4. – С.8-18

84. Медведев, А. Промышленные видеокамеры для систем машинного зрения [Текст] / Алексей Медведев // Современные технологии автоматизации. – 2013. – №4. – С. 26-30

85. *GigE Vision* - новый стандартный интерфейс доступа к сетевым видеокамерам. [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fastvideo.ru/info/gige/gige.htm>

86. Соколов, С.М., Автоматизация подготовки требований к программному обеспечению систем компьютерного зрения реального времени [Текст] / С.М. Соколов, А.А. Богуславский // Препринты ИПИМ им. М.В. Келдыша. – 2016. – № 141. – 16 с. Режим доступа: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2016-141> (Дата обращения 25.10.2017).

87. Соколов, С.М. Методические и практические аспекты разработки систем компьютерного видения для навигации и измерений [Текст] / С.М. Соколов, А.А. Богуславский, А.И. Васильев, О.В. Трифонов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – №3. – С. 76-85

88. Булатников, Е.В. Сравнение библиотек компьютерного зрения для применения в приложении, использующем технологию распознавания плоских изображений [Текст] / Е.В. Булатников, А.А. Гоева // // Вестник МГУП. – 2015. – №6. – С.85-91

89. Промышленные камеры *Basler*. Указания по применению. Начало работы с *pylon 5* и *OpenCV* [электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.baslerweb.com/ru/prodazhi-i-tekhpodderzhka/zagruzki/skachat-programmnoje-obespechenije/>

90. Система автоматического управления электрическим режимом плавильного агрегата с двумя источниками электронагрева с использованием интеллектуального датчика контроля агрегатного состояния расплавляемого металла [Текст] : пат. 2630160 МПК С2 F27В 3/28 / А.А. Бекаревич, М.В. Колистратов, Г.А. Фарнасов [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС". – 2016106984 ; заявл. 29.02.2016 ; опубл. 05.09.2017, Бюл. №25. – 9 с.

91. Никулин, А.Д. Тиристорная преобразовательная техника в цветной металлургии [Текст] / А.Д. Никулин, Л.С. Родштейн, В. Г. Сальников, В.А. Бобков. – М.: Металлургия, 1983. – 128 с.

92. Фарнасов, Г.А. Особенности переплава лома и слитков алюминиевых сплавов в дуговых печах постоянного тока и печах сопротивления [Текст] / Г.А. Фарнасов, М.В. Колистратов // Электрометаллургия. – 2013. – №8. – С. 38-41

93. ТРМ101 Измеритель регулятор микропроцессорный. Руководство по эксплуатации [электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.owen.ru/uploads/re_trm101_1625.pdf. (Дата обращения 25.10.2017).

94. БУСТ Блок управления тиристорами и симисторами. Руководство по эксплуатации [электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.owen.ru/uploads/re_bust_1496.pdf. (Дата обращения 25.10.2017).

95. Дьяконов, В. *MATLAB*. Обработка сигналов и изображений [Текст]: Специальный справочник/ В. Дьяконов, И. Абраменкова. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.

96. Колистратов, М.В. Печь комбинированного электронагрева, как объект виртуального компьютерного тренажера [Текст] / М.В. Колистратов // Инженерные и научные приложения на базе технологий *National Instruments* –

2013: Сборник трудов XII международной научно-практической конференции, Москва 28-29 ноября 2013 г. – М.: ДМК Пресс, 2013. – 436 с. – С. 307-309

97. Колистратов, М.В. Обучение с использованием электронного тренажера [Текст] / М.В. Колистратов, Г. А. Фарнасов // Электromеталлургия. – 2015. – №4. – С. 41-44

ПРИЛОЖЕНИЕ

Использование материалов диссертации в учебном процессе

В рамках реализации Программы создания и развития федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» на 2009 - 2017 годы, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 30 июля 2009 г. № 1073-р, по Направлению I «Развитие передовых образовательных программ и технологий» автором в составе рабочей группы с д.т.н. проф. Фарнасовым Геннадием Алексеевичем и Ваттаной Артуром Бунтавовичем был создан электронный обучающий тренажер «Комплекс плавильных печей» [96, 97]. Разработанный тренажер основан на рабочем проекте промышленной печи комбинированного электронагрева [42], что делает возможным ознакомление с конструкцией каждой детали, узла и печи в реальных размерах.

В тренажерный комплекс вошли следующие модули:

- видео;
- расчет параметров различных плавильных агрегатов (математические модели);
- лабораторная работа;
- электронный учебник;
- модуль для тестирования.

Модуль «видео» включает в себя видеофайлы, демонстрирующие сборку-разборку 3D-моделей основных узлов печи, перемещение различных узлов относительно друг друга, непосредственную работу печи. Видео для этого модуля создавалось в несколько этапов. Сначала по чертежам в программе *SolidWorks* были созданы 3D-модели каждой детали, затем детали

собирались в узлы (сборки), которые в свою очередь тоже соединялись между собой. Далее встроенными средствами программы *SolidWorks* создавались трассировки движения элементов сборки относительно друг друга во времени. В итоге получилась анимация движения. Следующим этапом был перевод полученной анимации в формат, пригодный для просмотра на любом компьютере, не содержащим вышеупомянутую программу.

В результате проведенной работы получился большой массив видеофайлов. Для просмотра видео была создана специальная программа-просмотрщик. В данной программе реализована возможность выбора узла, при этом на лицевой панели программы становятся активными кнопки, сигнализирующие о наличии или отсутствии необходимого видеофайла. На рисунке П.1 показан интерфейс программы просмотра (демонстрируется разборка рабочего окна на составные части)

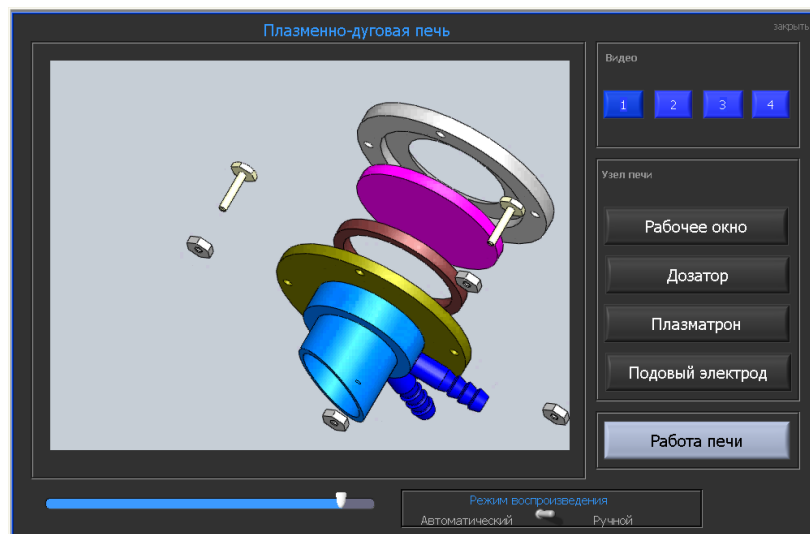


Рисунок П.1 – Программа просмотра видео

Модуль «Расчет параметров различных агрегатов» включает в себя программы расчета электрических, тепловых режимов выбранного типа печи. Пользователю необходимо ввести исходные данные и программа проведет интересующий расчет. Пример одной из программ представлен на рисунке П.2.

Расчет геометрических размеров

закрыть

Толщина слоев футеровки

магнезит, м

кирпич шамотный на плашку, м

засыпка мелким базальтом, м

гранулированный шамот на связке, м

асбестокартон, м

базальтокартон, м

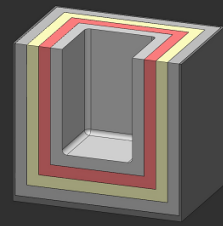
кожух из нерж стали, м

Размер рабочей камеры

Длина, м

Ширина, м

Высота, м



Входные данные

площадь для слоя магнезита, м2

площадь для кирпич шамотный, м2

площадь для засыпки мелким базальтом, м2

площадь для слоя шамот на связке, м2

площадь для слоя асбестокартон, м2

площадь для базальтокартона, м2

площадь для нерж.кожуха, м2

Размеры печи

В Д Ш

X X

Толщина футеровки, м

Объем рабочей камеры, м3

**Рисунок П.2 – Программа расчета геометрических размеров для печи
сопротивления**

Модуль «Лабораторная работа» предназначен для привития студентам навыка управления металлургическим агрегатом. В качестве такого агрегата выбрана печь комбинированного электронагрева (разработана проф., д.т.н. Фарнасовым Г.А.). Печь представляет собой плавильный агрегат, который позволяет проводить нагрев металла методом сопротивления и с помощью электрической дуги. На пульте управления данной печью соответственно вынесены органы управления, относящиеся к различным типам нагрева.

Данный пульт смоделирован в графическом пакете и на основании полученного изображения созданы элементы управления и индикаторы для лицевой панели реализуемого компьютерного приложения, соответствующие реальным элементам управления на пульте печи (рисунок П.3)

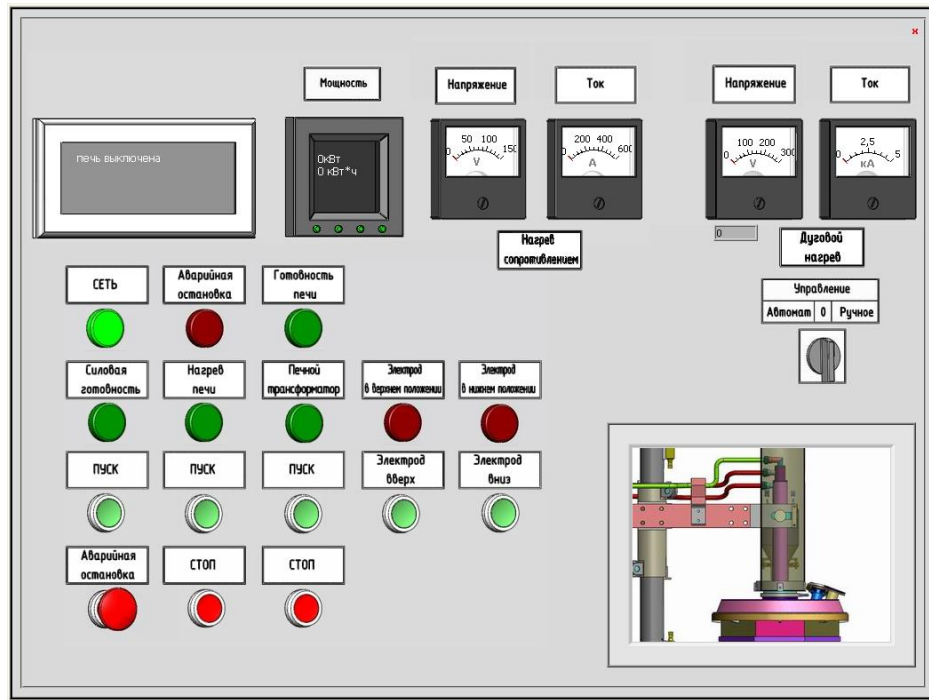


Рисунок П.3 – Пульт управления печи

При реализации алгоритма работы была заложена многовариантность работы печи в зависимости от нажатия кнопок на пульте управления. Кроме того, в код программы заложено отслеживание неправильных действий оператора в ручном режиме управления печью, которые могут привести к возникновению аварийных и внештатных ситуаций, таких как обрыв дуги, перегрев питающего трансформатора вследствие длительного состояния короткого замыкания при зажигании дуги, повреждение электрода при контакте с шихтой и т.п.

Пользователю предлагается провести ряд плавов при различных режимах работы печи:

плавка только сопротивлением;

плавка только дугой;

плавка одновременно сопротивлением и дугой.

На основании полученных результатов рассчитывается производительность и удельный расход электроэнергии при каждом режиме плавки.

В момент проведения плавки на пульте показывается изображение управляемой печи для визуального контроля плавки (видно поднятие и опускание электрода).

Модуль «Электронный учебник» создан по материалам учебника Электротехника, электроника, электрооборудование [33]. Особенностью электронного учебника является возможность перемещения по разделам с помощью специального меню (рисунок П.4)

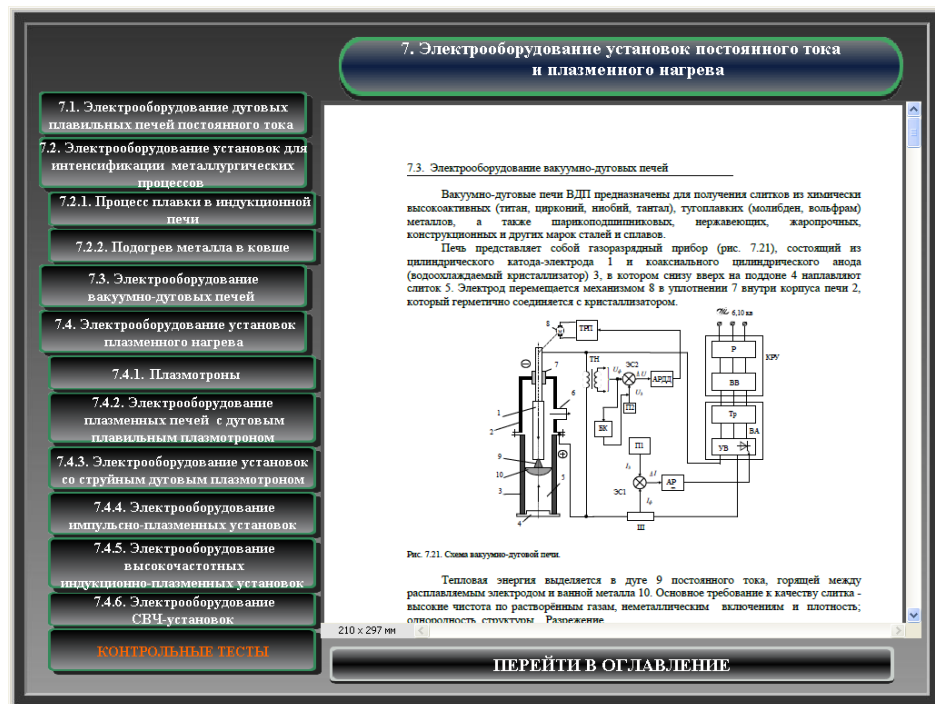


Рисунок П.4 – Электронный учебник

Модуль «Тестирование» содержит тестовые задания, рассчитанные на проверку знаний по основам электротехники и электроники применительно к металлургии.